

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh synchronního stroje s vyniklými póly

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk ŠVEC**
Osobní číslo: **E10N0020K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh synchronního stroje s vyniklými póly**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Proveďte elektromagnetický návrh synchronního generátoru s následujícími parametry:
 $S=8000$ kVA; $U_s=6300$ V; $2p=10$; $m=3$; $f=50$ Hz; $\cos \varphi=0,75$; $\varphi=0,7$
2. Popište vinutí statoru včetně zjištění možného počtu paralelních větví a nakreslení řezu drážky.
3. Nakreslete schématicky příčný a podélný řez strojem

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Kopylov, I.P. : Stavba elektrických strojů
2. Červený, J. : Postup při návrhu synchronního stroje

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Josef Červený, CSc.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 17. října 2011
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2012


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná diplomová práce pojednává o elektromagnetickém návrhu synchronního stroje s vyniklými póly dle zadaných parametrů. Dále se tato práce zabývá vinutím statoru a zjištěním možného počtu paralelních větví. V CAD programu je nakreslen příčný a podélný řez navrženého synchronního stroje.

Klíčová slova

Návrh synchronního stroje s vyniklými póly, synchronní stroj, elektromagnetický návrh, statorové vinutí, stator, rotor, vzduchová mezera, magnetický obvod, řez drážky, ztráty, účinnost.

Abstract

This graduation thesis deals with electromagnetic design of a salient pole synchronous machine according to set parameters. The thesis is also focused on stator winding and finding possible number of parallel branch circuits. There are drawings of longitudinal and cross sections of the designed synchronous machine made in CAD.

Key words

Design of the salient-pole synchronous machine, synchronous machine, electromagnetic design, excitation winding, stator winding, stator, rotor, air gap, magnetic circuit, groove section, losses, efficiency.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 8.5.2012

Bc. Zdeněk Švec

.....

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Josefovi Červenému, CSc. za cenné rady, připomínky a metodické vedení při práci.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 SYNCHRONNÍ STROJ	16
1.1 KONSTRUKČNÍ PŘEDVÝPOČET	17
1.1.1 Základní rozdělení synchronních strojů	17
1.1.2 Rozdělení alternátorů podle způsobu pohonu	17
1.2 MOŽNOSTI VYUŽITÍ HYDROALTERNÁTORŮ	18
2 ZADANÉ HODNOTY	19
3 ZÁKLADNÍ HODNOTY	20
4 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU	20
4.1 VOLBA HLAVNÍCH ROZMĚRŮ STROJE	20
4.2 NÁVRH VINUTÍ INDUKTU (STATORU)	21
4.2.1 Rozdělení statoru (induktu) na segmenty	23
4.2.2 Parametry vinutí	23
4.2.3 Fázorová hvězdice	26
4.2.4 Tingleyho schéma vinutí	26
4.2.5 Pilové schéma vinutí	27
4.2.6 Úsečkové schéma vinutí	27
4.2.7 Výpočet činitelů vinutí	29
4.3 NÁVRH DRÁŽKY	32
4.3.1 Rozměry drážky a zubu	32
4.3.2 Rozměry vodiče vinutí induktu	33
4.4 ODPOR A ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATOROVÉHO VINUTÍ	35
4.4.1 Rozměry čel statorového vinutí	35
4.4.2 Odpor jedné fáze statorového vinutí	38
4.4.3 Rozptylová reaktance statorového vinutí	39
4.5 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU	39
4.5.1 Výpočet magnetického toku	39
4.5.2 Velikost vzduchové mezery	40
4.5.3 Magnetické napětí reakce kotvy	41
4.5.4 Dimenzování magnetického obvodu	42
4.5.5 Délka středních siločar částí magnetického obvodu	44
4.5.6 Charakteristika naprázdno	44
4.6 MAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKA	45
4.6.1 Magnetizační charakteristika zubové vrstvy	45

4.6.2	Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu.....	46
4.6.3	Charakteristika naprázdno	46
4.7	NÁVRH BUDÍCÍHO VINUTÍ.....	47
4.7.1	Rozměry pólového nástavce s parametry budící cívky.....	47
4.7.2	Orientační výpočet oteplení budící cívky.....	50
4.8	ZTRÁTY A ÚČINNOST	51
4.8.1	Jouleovy ztráty.....	51
4.8.2	Ztráty v železe	52
4.8.3	Ztráty povrchové.....	53
4.8.4	Ztráty mechanické.....	54
4.8.5	Ztráty přídatné (dodatečné).....	54
4.8.6	Ztráty celkové.....	54
4.8.7	Účinnost.....	55
5	KONSTRUKČNÍ ČÁSTI A MECHANICKÉ VÝPOČTY STROJE.....	55
5.1	VÝPOČTY ROZMĚRŮ HŘÍDELE	55
5.2	VÝPOČET ROZMĚRŮ KLADIVA.....	55
5.3	NÁVRH TLUMÍCÍHO VINUTÍ	59
5.4	PŘÍČNÝ A PODÉLNÝ ŘEZ STROJE.....	60
	ZÁVĚR.....	61
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	62
	PŘÍLOHY.....	1

Úvod

Ve své předkládané diplomové práci popisuji synchronní stroj s vyniklými póly – hydroalternátor. Jedná se o typ stroje, který je důležitý pro výrobu elektrické energie. Pro pohon tohoto stroje se používá několika typů turbín, instalovaných ve vodních elektrárnách.

Řeším zde elektromagnetický návrh synchronního stroje s vyniklými póly dle zadaných parametrů. Dále zde popisuji statorové vinutí stroje, jeho výpočty rozměrů, schémata a nákresy. Zároveň je zde výpočet a nákres řezu drážky statoru.

V závěru diplomové práce jsou technické výkresy příčného a podélného řezu navrženého synchronního stroje, které jsem nakreslil v programu AutoCAD.

Seznam symbolů

Symbol	Název	Jednotka
A	obvodová proudová hustota	$A \cdot m^{-1}$
a	přesahující část pólového nástavce	mm
a	šířka krčku kladiva	m
a_n	předběžná šířka budící cívky	mm
a_{ss}	počet dvojic paralelních větví	-
a_{\approx}	počet paralelních větví	-
B_{jr}	magnetická indukce ve jhu rotoru	T
B_{js}	magnetická indukce ve jhu statoru	T
B_p	magnetická indukce v pólu	T
B_{δ}	magnetická indukce	T
b	šířka spodní části kladiva	m
b_c	šířka budící cívky	m
$b_{\check{c}}$	šířka čela	mm
b_d	šířka drážky	mm
b_n	šířka pólového nástavce	m
b_p	šířka pólu	m
b_v	šířka holého vodiče	mm
b_{vi}	šířka izolovaného vodiče	mm
C	Essonův činitel	$V \cdot A \cdot \min \cdot m^{-3} \cdot ot^{-1}$
C_1	činitel zákl. harm. mag. indukce ve vzduch. mezeře	-
C_{d1}	deformační činitel magnetického napětí v podélné ose	-
C_{q1}	deformační činitel magnetického napětí v příčné ose	-
c	vzdálenost mezi čely	mm
c	výška krčku kladiva	m
$\cos \varphi$	účinnost	-
D_1	vnitřní průměr statoru (induktu)	m
D_h	průměr hřídele v nejširším místě	m
D_{je}	vnější průměr statoru	m
D_t	průměr tyče	mm
d	výška rozšířené spodní části kladiva	m
d_h	průměr hřídele v nejužším místě	m

Symbol	Název	Jednotka
E	vyložení čel	mm
F' _a	magnetické napětí reakce kotvy	A
F _b	magnetické budící napětí	A
F _c	odstředivá síla cívky budícího vinutí	N
F _{cc}	součet odstředivých sil	N
F _{cc1}	odstředivá síla na jeden pól	N.m ⁻¹
F _{d1}	amplituda zákl. harm. mag. napětí v podélném směru	A
F _n	odstředivá síla pólového nástavce	N
F _p	odstředivá síla pólu	N
F _{q1}	amplituda zákl. harm. mag. napětí v příčném směru	A
F _δ	magnetické napětí ve vzduchové mezeře	A
f	frekvence	Hz
g	celkový počet vodičů v drážce nad sebou	-
h ₀	výška můstku drážky	mm
h ₀	výška krčku	mm
h ₁	výška klínu drážky	mm
h ₂	hloubka drážky bez klínu	mm
h _c	výška budící cívky	m
h _d	hloubka drážky	mm
h _{jr}	výška jha rotoru	m
h _{js}	výška jádra induktu	m
h _n	výška pólového nástavce	m
h _p	výška pólu	m
h _v	výška holého vodiče budícího vinutí	mm
h _{vi}	výška izolovaného vodiče budícího vinutí	mm
I ₁	fázový proud	A
I ₂	proud v pólovém nástavci	A
I _{2t}	proud v tlumící tyči	A
I _b	budící proud	A
i	počet paketů	-
i _k	počet chladících kanálů	-
K	konstanta závislá na napětí	-

Symbol	Název	Jednotka
k	překládové číslo	-
k_c	Cartérův činitel (celkový)	-
k_{cd}	Cartérův činitel (respektující vliv drážkování)	-
k_{ck}	Cartérův činitel (respektující vliv ventilačních kanálů)	-
k_{cu}	činitel zvýšení elektrického odporu	-
k_{fe}	činitel plnění železa	-
k_h	součinitel	-
k_o	činitel povrchových ztrát	-
k_{vv}	činitel vinutí v té harmonické	-
L	celková délka induktu	m
L_p	délka pólu	m
L_r	délka rotoru	m
l_{be}	vnější obvod budící cívky	m
l_{bs}	střední délka závitů budící cívky	m
l_{ξ}	délka čela	m
l_e	efektivní délka stroje	m
l_p	délka střední siločáry pólu	m
l_r	délka střední siločáry jha rotoru	m
l_s	délka střední siločáry jha statoru (induktu)	m
l_v	délka vodiče	m
m	počet fází	-
m_c	hmotnost cívky budícího vinutí	kg
m_n	hmotnost pólového nástavce	kg
m_p	hmotnost pólu	kg
m'	matematický počet fází	-
m_{Fej}	hmotnost jádra statoru	kg
m_{Fez}	hmotnost zubů statoru	kg
N_b	počet závitů budící cívky	-
N'_{pl}	počet závitů v jedné poloze	-
N_s	počet závitů jedné fáze v sérii	-
N_t	počet tyčí na pól	-
n	otáčky	ot.min ⁻¹

Symbol	Název	Jednotka
n_s	počet segmentů	-
n_d	počet vodičů v drážce	-
n_p	počet poloh budící cívky	-
n_s	počet segmentů	-
O_{2pc}	ochlazovací povrch všech cívek	m^2
o	délka oka	mm
P	činný výkon	W
ΔP	ztráty celkové	W
ΔP_{cu1}	ztráty ve vinutí statoru	W
ΔP_{cub}	ztráty v budícím vinutí	W
ΔP_{Fej}	magnetické ztráty ve jhu	W
ΔP_{Fez}	magnetické ztráty v zubech statoru	W
ΔP_m	mechanické ztráty	W
ΔP_p	povrchové ztráty	W
$\Delta P_{přid}$	přídavné ztráty	W
Δp_{Fe}	ztrátové číslo plechů	$W.kg^{-1}$
p	počet pólpárů	-
$2p$	počet pólů	-
Q	počet drážek induktu	-
Q_f	počet drážek na jedné fázi	-
Q_p	počet drážek na pól	-
$Q_{př}$	počet drážek na překlad	-
q	počet drážek na pól a fázi	-
R	střední poloměr ohybu čela	mm
$R_{b/75}$	odpor všech cívek budícího vinutí	Ω
$R_{1/20}$	elektrický odpor při 20°C pro střídavý proud	Ω
$R'_{1/20}$	elektrický odpor při 20°C pro stejnosměrný proud	Ω
$R_{1/75}$	elektrický odpor při 75°C pro střídavý proud	Ω
r	vnitřní poloměr ohybu čela	mm
r_c	poloměr cívky budícího vinutí	m
r_n	poloměr pólového nástavce	m
r_p	poloměr pólu	m

Symbol	Název	Jednotka
S	zdánlivý výkon	VA
S ₁	skutečný průřez jednoho vodiče	mm ²
S _{cu1}	průřez vodiče vinutí statoru	mm ²
S _{cub}	skutečný průřez vodiče budící cívky	mm ²
S' _{cub}	průřez vodiče budící cívky	mm ²
S _t	průřez tyče	mm ²
š _k	šířka kanálu	m
š _p	šířka paketu	m
t _{d1}	mezidrážková rozteč	mm
t _{d2}	drážková rozteč tyčí	mm
t _{kc}	tloušťka kostřičky budící cívky	mm
t _p	pólová rozteč	m
U	sdržené napětí	V
U _b	budící napětí	V
U _f	fázové napětí	V
u	počet cívek v jedné drážce	-
u _R	úbytek napětí na ohmickém odporu	%
u _σ	úbytek napětí na rozptylové reaktanci	%
V _c	objem cívky budícího vinutí	m ³
V _n	objem pólového nástavce	m ³
V _p	objem pólu	m ³
v	obvodová rychlost rotoru	m.s ⁻¹
X _σ	rozptylová reaktance statorového vinutí	Ω
x	výběh cívky z drážky	mm
x _d	hodnota nesyčené synchronní reaktance	%
x _σ	hodnota rozptylové reaktance	%
y	délka osy vinutí mezi okem a výběhem z cívky	mm
y _{1d}	cívkový krok	-
y ₁	přední cívkový krok	-
y ₂	zadní cívkový krok	-
y _k	komutátorový krok	-
z _i	šířka zubu	mm

Symbol	Název	Jednotka
$\Delta \vartheta_{Cub}$	oteplení cívky	$^{\circ}\text{C}$
α	činitel pólového krytí	-
α	součinitel přestupu tepla	$\text{W} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2$
α_{ξ}	úhel sklonu čel vinutí	$^{\circ}$
β	poměrné zkrácení kroku	-
δ	velikost vzduchové mezery	mm
η	účinnost	%
λ	štíhlostní poměr	-
ξ	činitel přídatných ztrát	-
ρ_{cu}	měrný odpor mědi	$\Omega \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$
ρ_{cu}	hustota mědi	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ_{Fe}	hustota železa	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
σ_A	skutečné namáhání kladiva	MPa
σ_{cu1}	proudová hustota ve statorovém vinutí	$\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$
σ_{cub}	proudová hustota vodiče budící cívky	$\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$
σ_{dov}	dovolené namáhání kladiva	MPa
σ_{max}	maximální namáhání kladiva	MPa
σ_t	proudová hustota	$\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$
Φ	magnetický tok	Vs
ω	otáčivá rychlost	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

1 Synchronní stroj



Obr. 1 Hydroalternátory [23]

Synchronní stroje jsou elektrické stroje točivé. Název těchto strojů je odvozen od rychlosti rotoru a točivého magnetického pole statoru. Obě tyto rychlosti jsou shodné. Nejdůležitějšími a nejrozšířenějšími synchronními stroji jsou alternátory pro výrobu elektrické energie.

Dalším typem synchronních strojů jsou synchronní motory, které se využívají pro některé druhy pohonů v průmyslových provozech, kde se nepožaduje jejich časté spouštění a změny otáčení.

Výhodou synchronních strojů je skutečnost, že kmitočet napětí je přímo úměrný jejich otáčkám.

Tomu odpovídá níže uvedený vztah:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1)$$

kde:

n je otáčivá rychlost [ot/min]

f kmitočet [Hz]

p počet pólpárů

Údaje o nejběžnějších otáčkách synchronních strojů pro frekvenci $f = 50$ Hz jsem uvedl v tabulce 1.

Tab. 1 Nejběžnější otáčky synchronních strojů [11]

p	1	2	3	4	5
n	3000	1500	1000	750	600

1.1 Konstrukční provedení

1.1.1 Základní rozdělení synchronních strojů

Synchronní stroje rozdělujeme na:

- **alternátory** – přeměňují mechanickou energii na elektrickou. Jejich hlavní využití je v energetice, kdy vyrábí střídavý elektrický proud dodávaný do energetických rozvodných sítí. Alternátory malých výkonů s usměrňovačem jsou nedílnou součástí elektroinstalace každého automobilu.
- **motory** – přeměňují elektrickou energii na mechanickou při stálých synchronních otáčkách a téměř konstantním zatížení. Nevýhodou těchto strojů je jejich vlastní rozběh z klidového stavu do synchronních otáček.
- **kompenzátory** – pracují jako nezatížené motory, kdy do elektrické sítě dodávají jalový výkon. Slouží ke kompenzaci účinníku v elektrické síti.

1.1.2 Rozdělení alternátorů podle způsobu pohonu

Dle způsobu pohonu rozdělujeme alternátory na:

- **turboalternátory** – jsou stroje s hladkým rotorem. Tyto stroje jsou rychloběžné s rychlostí 3000 ot/min. Průměr rotoru je s ohledem na mechanické podmínky přibližně 1 metr. Délka stroje bývá i 7 metrů. Rotor je uložen horizontálně. Tyto stroje se využívají v tepelných elektrárnách, kde je pohon zajištěn pomocí parních, nebo plynových turbín.
- **hydroalternátory** – mají rotory s vyniklými póly. Jedná se o pomaloběžné stroje s rychlostí 100 – 1500 ot/min. Tyto stroje jsou na rozdíl od turboalternátorů malé osově délky o rozměrech 1 – 2 metry a velkým průměrem v rozmezí 6 – 20 metrů. Uložení hydroalternátorů závisí na konstrukčním provedení turbíny a bývá nejčastěji vertikální. Hydroalternátory, jak již název sám napovídá,



Obr. 2 Stator hydroalternátoru [20]

jsou instalovány ve vodních elektrárnách, kde je pohon zajišťován pomocí vodních turbín.

1.2 Možnosti využití hydroalternátorů

V rámci své diplomové práce jsem se zabýval možnostmi využití navrhovaného hydroalternátoru o výkonu 6 MW. Téměř stejný výkon má vodní elektrárna Vrané, která má instalovaný výkon 2 x 6,94 MW. Tato elektrárna byla uvedena do provozu v roce 1936. Tento poslední stupeň vltavské kaskády má instalovány dvě Kaplanovy turbíny.

Pro porovnání jsem se zajímal o technické parametry dalších známých českých vodních elektráren, kdy jsem zjistil následující:

- vodní elektrárna Hracholusky má instalovaný výkon 2,55 MW. Tato byla uvedena do provozu v roce 1964, kdy má instalovanu jednu Kaplanovu turbínu.
- vodní elektrárna Lipno I má instalovaný výkon 2 x 60 MW. Uvedena do provozu byla v roce 1959, kdy má instalovány dvě Francisovy turbíny.
- vodní elektrárna Orlická má instalovaný výkon 4 x 91 MW. Uvedena do provozu byla v letech 1961 – 1962, kdy má instalovány čtyři Kaplanovy turbíny.
- vodní elektrárna Slapy má instalovaný výkon 3 x 48 MW. Uvedena do provozu byla v letech 1954 – 1955, kdy má instalovány tři Kaplanovy turbíny.
- vodní elektrárna Dlouhé Stráně má instalovaný výkon 2 x 325 MW. Uvedena do provozu byla v roce 1996. Jedná se o vodní elektrárnu, která se může pyšnit třemi „nej“ (největší instalovaný výkon, největší reverzní turbína v Evropě a největší spád v ČR, který je 510,7 metru). Má instalovány dvě Francisovy turbíny.



Obr. 3 Rotor hydroalternátoru [20]

Horizontální hydroalternátory jsou konstruovány s Peltonovými turbínami. Vertikální hydroalternátory pak pohání Kaplanovy, nebo Francisovy turbíny. Francisovy turbíny se rovněž vyrábí jako tzv. reverzační, určené pro přečerpávací elektrárny. V České republice je asi nejznámějším výrobcem a dodavatelem vodních turbín, včetně kompletní strojní a elektrické části vodních elektráren společnost ČKD

Blansko SMALL HYDRO, s r.o., která navázala na tradici ČKD Blansko sahající až do roku 1918.

Tab. 2 Standardní konstrukční řešení turbín [21]

Typ	Spád (m ³)	Výkon (kW)
Kaplanova	2 - 40	200 - 6 000
Francisova	10 - 300	200 - 16 000
Peltonova	70 - 800	300 - 25 000

2 Zadané hodnoty

Zdánlivý výkon $S = 8000 \text{ kVA}$

Sdružené napětí $U = 6300 \text{ V}$

Počet pólů $2p = 10$

Počet fází $m = 3$

Frekvence $f = 50 \text{ Hz}$

Účinník $\cos \varphi = 0,75$

Činitel pólového krytí $\alpha = 0,7$

3 Základní hodnoty

Činný výkon:

$$P = S \cdot \cos \varphi = 8000 \cdot 0,75 = 6000 \text{ kW} \quad (2)$$

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637 \text{ V} \quad (3)$$

Otáčky:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{5} = 600 \text{ ot / min} \quad (4)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{8000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6300} = 733,14 = 733 \text{ A} \quad (5)$$

4 Elektromagnetický návrh synchronního generátoru

4.1 Volba hlavních rozměrů stroje

Při návrhu synchronního stroje je důležité začít stanovením hlavních rozměrů stroje, tzn. vnitřního průměru (vrtání) induktu D_1 a délkou induktu l_e .

Průměr induktu D_1 :

a) Podle empirického vztahu:

$$D_1 = 0,08 \cdot (2p)^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot 10^{0,625} \cdot 8000^{0,185} = 1,78 \text{ m} \quad (6)$$

b) Odečtem z grafu, při znalosti zdánlivého výkonu S a počtu pólů $2p$ (příloha č. 1):

$$D_1 = 1,78 \text{ m}$$

Podle zadaných hodnot zdánlivého výkonu S a počtu pólů $2p$ jsem určil obvodovou proudovou hustotu A a indukci ve vzduchové mezeře B_δ . Tyto hodnoty jsem odečetl z grafu (příloha č. 2):

Obvodová proudová hustota:

$$A = 67000 \text{ A/m}$$

Indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_\delta = 0,77 \text{ T}$$

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 1,78}{10} = 0,559 \text{ m} \quad (7)$$

4.2 Návrh vinutí induktu (statoru)

Mezidrážková rozteč s ohledem na průměr a napětí volím:

$$t_{d1} = 49 \text{ mm}$$

Počet drážek induktu:

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 1780}{49} = 114 \quad (8)$$

Předběžný počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{114}{10 \cdot 3} = 3,8 \quad (9)$$

Jelikož je počet drážek na pól a fázi menší než 7, volím zlomkové vinutí:

$$q = \frac{n}{c} \quad (10)$$

Pro navržení počtu drážek na pól a fázi jsem musel dodržet tyto zásady:

- 1) Počet drážek induktu Q musí být dělitelný počtem fází m

$$Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2p \cdot m \cdot q}{m} = 2p \cdot q = 2p \cdot \frac{n}{c} = \text{číslo celé} \quad (11)$$

- 2) Počet drážek na pól a fázi q musí být číslo celé, případně zlomek, který již ale nelze dále krátit. Kromě toho c nesmí být dělitelné počtem fází m a musí být menší než počet pólových dvojic p

- 3) Pro výhodnou volbu počtu segmentů plechů induktu je vhodné, aby se počet drážek dal rozložit na co největší počet činitelů [5]

Pro velikost počtu drážek na pól a fázi jsou vhodné a možné následující hodnoty:

$$1. \quad q = 3\frac{1}{5} = \frac{16}{5}, \text{ potom je } Q = 2p \cdot m \cdot q = 10 \cdot 3 \cdot \frac{16}{5} = 96 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \quad (12)$$

$$2. \quad q = 3\frac{2}{5} = \frac{17}{5}, \text{ potom je } Q = 2p \cdot m \cdot q = 10 \cdot 3 \cdot \frac{17}{5} = 102 = 2 \cdot 3 \cdot 17 \quad (13)$$

$$3. \quad q = 3\frac{3}{5} = \frac{18}{5}, \text{ potom je } Q = 2p \cdot m \cdot q = 10 \cdot 3 \cdot \frac{18}{5} = 108 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \quad (14)$$

$$4. \quad q = 3\frac{4}{5} = \frac{19}{5}, \text{ potom je } Q = 2p \cdot m \cdot q = 10 \cdot 3 \cdot \frac{19}{5} = 114 = 2 \cdot 3 \cdot 19 \quad (15)$$

$$5. \quad q = 3\frac{1}{2} = \frac{7}{2}, \text{ potom je } Q = 2p \cdot m \cdot q = 10 \cdot 3 \cdot \frac{7}{2} = 105 = 3 \cdot 5 \cdot 7 \quad (16)$$

Na základě shora uvedených výpočtů volím:

$$q = 3\frac{1}{5} = \frac{16}{5} \quad (17)$$

Počet drážek induktu:

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 10 \cdot 3 \cdot \frac{18}{5} = 96 \quad (18)$$

Počet drážek na fázi:

$$Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2p \cdot m \cdot q}{m} = \frac{10 \cdot 3 \cdot 3,8}{3} = 2p \cdot q = 10 \cdot 3,8 = 38 \quad (19)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{96}{10} = 9,6 \quad (20)$$

4.2.1 Rozdělení statoru (induktu) na segmenty

Při skládání plechů jsem zvolil poloviční překlad ($k=2$), kdy musí platit:

$$Q = k \cdot n_s \cdot Q_{př} \quad (21)$$

Rozklad počtu drážek induktu Q na prvočinitele jsem zvolil jako nejvhodnější variantu č. 1 (vztah 12):

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 10 \cdot 3 \cdot \frac{16}{5} = 96 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \quad (22)$$

Tedy vychází:

Překladové číslo: $k = 2$

Počet segmentů: $n_s = 8$

Počet drážek na překlad:

$$Q_{př} = \frac{Q}{n_s \cdot k} = \frac{96}{8 \cdot 2} = 6 \quad (23)$$

4.2.2 Parametry vinutí

Předběžný počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 1,78 \cdot 67000}{2 \cdot 3 \cdot 733} = 85,19 \quad (24)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{\approx} \cdot N_s}{pq} = \frac{2 \cdot 85,19}{5 \cdot \frac{16}{5}} = 10,65 \Rightarrow \text{volím } 10 \quad (25)$$

Počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí volím:

$$a_{\approx} = 2$$

Při výpočtu jsem zvolil $a_{\approx} = 2$. Pokud bych zvolil $a_{\approx} = 1$, byl by výsledek $n_d = 5,32$. Vzhledem k tomu, že pro dvouvrstvé vinutí musí být počet vodičů v drážce sudé číslo, musel bych hodnotu 5,32 zaokrouhlit na 4 nebo 6. Jednalo by se však o velmi hrubé zaokrouhlení, které by dostalo výrazně odlišnou hodnotu počtu závitů v sérii a následně i odlišnou skutečnou obvodovou proudovou hustotu. V důsledku toho tedy i jiné elektrické využití stroje.

Z tohoto důvodu jsem zvolil dvě paralelní větve, kdy mi vyšel počet vodičů v drážce $n_d = 10,65$. Tuto hodnotu jsem zaokrouhlil na $n_d = 10$, kdy se jedná o hodnotu velmi blízkou původní, přičemž následující hodnoty se změní pouze nepatrně [2].

Počet závitů v sérii jedné fáze:

$$N_s = \frac{n_d pq}{a_{\approx}} = \frac{10 \cdot 5 \cdot \frac{16}{5}}{2} = 80 \quad (26)$$

Skutečná hodnota obvodové proudové hustoty:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 733}{\pi \cdot 1,78} \cdot 80 = 62918 \text{ A/m} \quad (27)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{96}{10} = 9,6 \quad (28)$$

Cívkový krok volím:

$$y_{1d} = 8$$

Poměrné zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{8}{9,6} = 0,83 \quad (29)$$

Krok na komutátoru:

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot Q \pm a_{ss}}{p} = \frac{1 \cdot 96 - 1}{5} = 19 \quad (30)$$

Základní stejnosměrné vinutí jsem zvolil:

- vlnové – jelikož $\varepsilon=1$
- sériové – jelikož $a_{ss}=1$
- nekřížené – jelikož je v čitateli znaménko „-“

Kroky v počtu cívkových stran

Přední cívkový krok:

$$y_1 = 2 \cdot u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 8 + 1 = 17 \quad (31)$$

Zadní cívkový krok:

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 19 - 17 = 21 \quad (32)$$

Vinutí střídavé

Počet skupin vinutí:

$$a_{ss} \cdot m' = 1 \cdot 6 = 6 \quad (33)$$

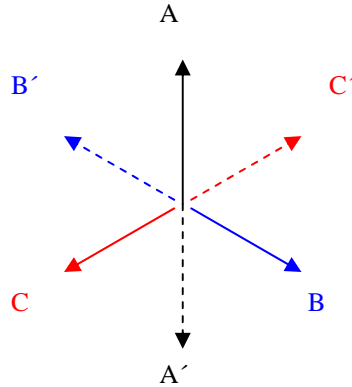
Počet skupin v jedné fázi:

$$\frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{1 \cdot 6}{3} = 2 \quad (34)$$

Počet cívek ve skupině:

$$\frac{Q}{a_{ss} \cdot m'} = \frac{96}{1 \cdot 6} = 16 \quad (35)$$

4.2.3 Fázorová hvězdice



Obr. 4 Fázorová hvězdice

4.2.4 Tingleyho schéma vinutí

Počet řádků:

$$2p = 10 \quad (36)$$

Počet sloupců, velikost α

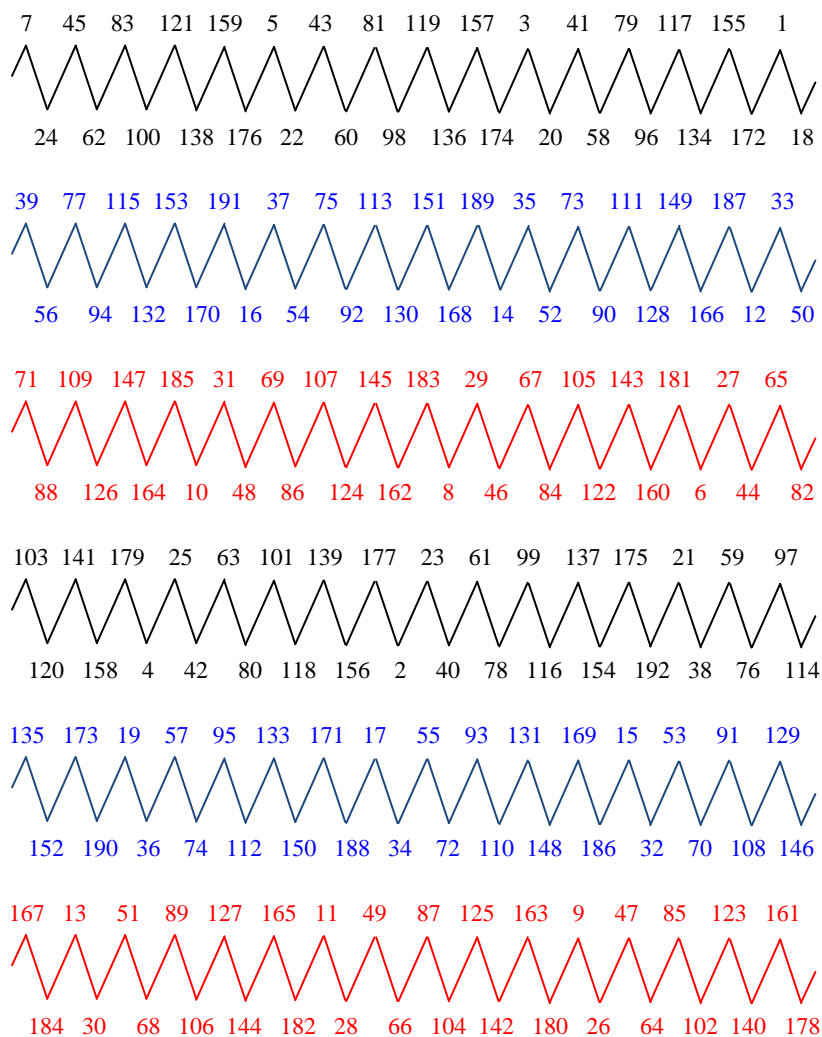
$$q = \frac{n}{c} = 3,2 = 3\frac{1}{5} = \frac{16}{5} \rightarrow n = 16 \quad (37)$$

$$m \cdot n = 3 \cdot 16 = 48 \quad (38)$$

$$\alpha = \frac{180^\circ}{m \cdot n} = \frac{180^\circ}{3 \cdot 15} = \frac{180^\circ}{48} = 3,75^\circ \quad (39)$$

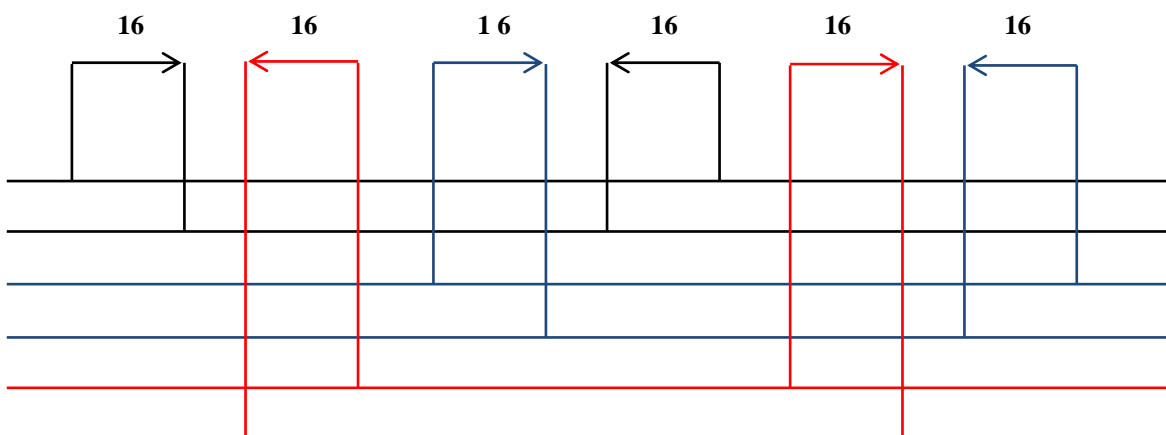
Tingleyho schéma vinutí jsem zpracoval v příloze č. 14.

4.2.5 Pilové schéma vinutí

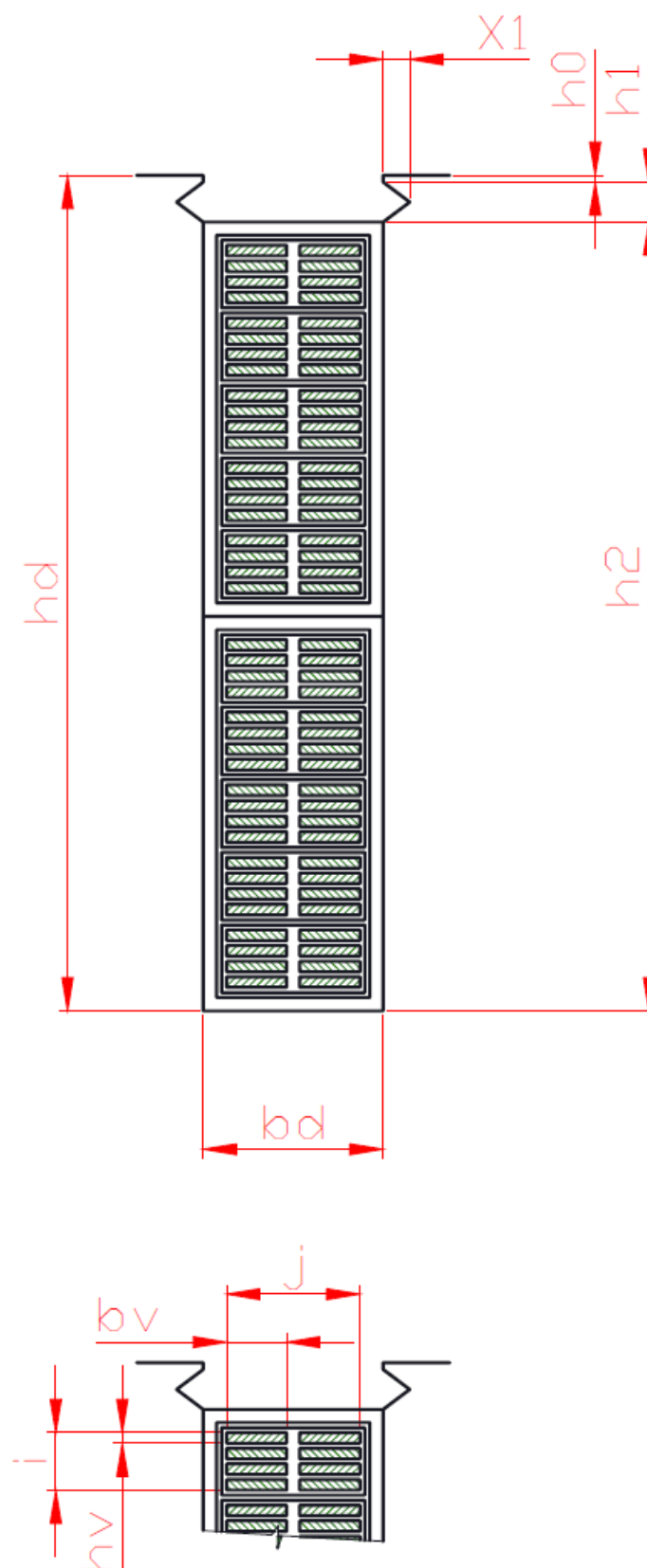


Obr. 5 Pilové schéma vinutí

4.2.6 Úsečkové schéma vinutí



Obr. 6 Úsečkové schéma vinutí



Obr. 7 Drážka statoru

V navrhovaném synchronním stroji je užito dvouvrstvé vlnové sériové nekřížené vinutí s poměrným zkrácením kroku $\beta = 0,83$. Vinutí je závitové, každá cívka je tvořena 5 závitů. V každé drážce statoru je uloženo 10 vodičů. Vinutí je rozstříháno na 6 skupin. Jelikož je každá fáze tvořena dvěma skupinami po 16 cívkách, je možné tyto dvě skupiny spojit paralelně. Tedy jsem zvolit dvě paralelní větve $a_{\approx} = 2$.

Toto vinutí je uloženo ve statoru v otevřených drážkách tvaru M (viz obr. 7), přičemž je proti dynamickým účinkům elektrického proudu zajištěno drážkovými klíny. Materiál pro výrobu drážkových klínů je vyroben z nemagnetického materiálu z důvodu zamezení zvyšování rozptylového toku.

4.2.7 Výpočet činitelů vinutí

Činitel vinutí v té harmonické:

$$k_{vv} = \sin\left(v\beta\frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin\left(v\frac{\pi}{m'}\right)}{n \cdot \sin\left(v\frac{\pi}{m'n}\right)} \quad (40)$$

kde:

- v řád harmonické
- β poměrné zkrácení kroku
- m' matematický počet fází
- n čísel počet drážek na pól a fázi ($q = \frac{n}{c}$)

Činitel vinutí základní harmonické ($v = 1$):

$$k_{v1} = \sin\left(1 \cdot 0,83 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{16 \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 16}\right)} = 0,921 \quad (41)$$

Činitel vinutí 5. harmonické:

$$k_{v5} = \sin\left(5 \cdot 0,83 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin\left(5 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{16 \cdot \sin\left(5 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 16}\right)} = 0,045 \quad (42)$$

Činitel vinutí 7. harmonické:

$$k_{v7} = \sin\left(7 \cdot 0,83 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin\left(7 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{16 \cdot \sin\left(7 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 16}\right)} = -0,041 \quad (43)$$

Činitel vinutí 11. harmonické:

$$k_{v11} = \sin\left(11 \cdot 0,83 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin\left(11 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{16 \cdot \sin\left(11 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 16}\right)} = -0,087 \quad (44)$$

Činitel vinutí 13. harmonické:

$$k_{v13} = \sin\left(13 \cdot 0,83 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin\left(13 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{16 \cdot \sin\left(13 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 16}\right)} = -0,072 \quad (45)$$

Skutečná hodnota Essonova činitele elektromagnetického využití stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} A \cdot B_\delta \cdot k_{v1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 62,918 \cdot 0,77 \cdot 0,921 = 5,189 \frac{kVA}{m^3 \cdot \frac{ot}{min}} \quad (46)$$

Efektivní délka stroje:

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{8000}{5,189 \cdot 1,78^2 \cdot 600} = 0,811 \text{ m} \quad (47)$$

Štíhlostní poměr:

$$\lambda = \frac{l_e}{t_p} = \frac{0,811}{0,559} = 1,45 \quad (48)$$

S výpočtem délky stroje l_e se musí vypočítat i jeho štíhlostní poměr. Obě tyto hodnoty určují podmínky pro jeho chlazení. Podmínky pro chlazení se zhoršují s délkou stroje a velikostí štíhlostního poměru. Navrhovaný synchronní stroj s 10-ti póly se štíhlostním poměrem 1,45 daným podmínkám chlazení dle grafu 7.11 na str. 358 vyhovuje [5].

Předpokládám použití radiálních chladicích kanálů, které rozdělí plechový svazek induktu na pakety o zvolené šířce přibližně $\check{s}_p = 50$ mm, přičemž volím šířku kanálu $\check{s}_k = 10$ mm.

Počet paketů:

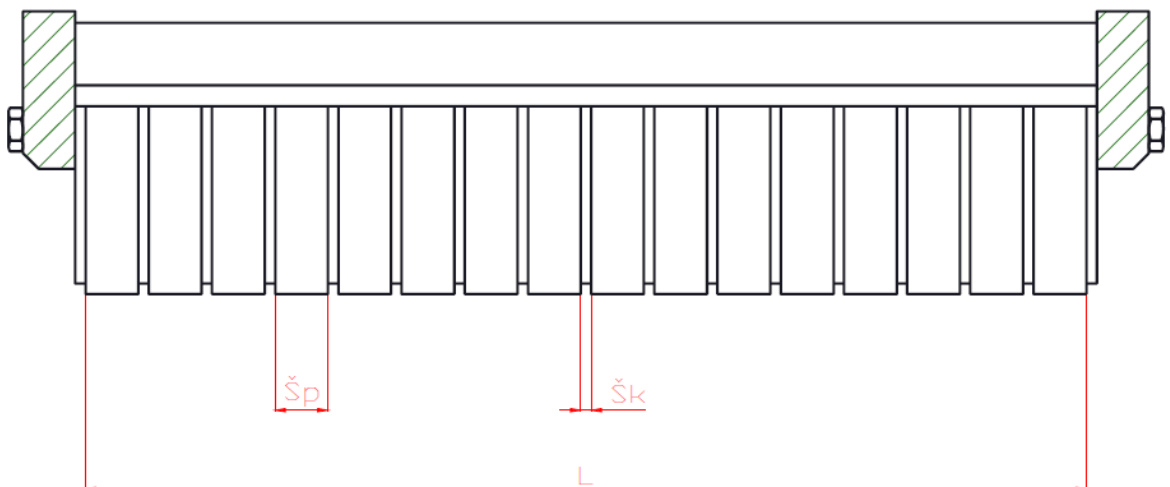
$$i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{0,811}{0,050} = 16,22 = 16 \quad (49)$$

Počet kanálů:

$$i_k = i - 1 = 16 - 1 = 15 \quad (50)$$

Celková délka induktu (včetně radiálních kanálů):

$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 0,811 + 0,01 \cdot 15 = 0,961 \text{ m} \quad (51)$$



Obr. 8 Statorový svazek

4.3 Návrh drážky

Na induktu jsem zvolil otevřenou obdélníkovou drážku tvaru M (příloha 3 a obr. 7). Zuby jsou lichoběžníkového tvaru. Do otevřených drážek se nechají snadněji vkládat již hotové cívky vinutí, které jsou zhotovovány mimo stroj. Nevýhodou těchto drážek je jejich velké otevření ve vzduchové mezeře a tím i zvětšení magnetického odporu v této vzduchové mezeře.

4.3.1 Rozměry drážky a zubu

Velikost drážkové rozteče na průměru D_1 :

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 1780}{96} = 58,3 \text{ mm} \quad (52)$$

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,77 \cdot 58,3}{1,55 \cdot 0,92} = 31,5 \text{ mm} \quad (53)$$

kde:

B'_{z1} je hodnota magnetické indukce v hlavě zubu (na průměru D_1). Volím $B'_{z1} = 1,55 \text{ T}$.

k_{Fe} je činitel plnění železa

Šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 58,3 - 31,5 = 26,8 \text{ mm} \quad (54)$$

Nejbližší normalizovaná šířka, kterou jsem určil z tabulky drážky M (příloha č. 4):

$$b_d = 27 \text{ mm}$$

Skutečná šířka zubu:

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 58,3 - 27 = 31,3 \text{ mm} \quad (55)$$

Jedná se o závitové vinutí $n_d = 10$. Tomu odpovídá pro napětí 6,3 kV následující uspořádání vodičů a izolace v drážce:

Tab. 3 Rozměry drážky s parametry vodičů a izolace

Poz.	Název	Šířka		Hloubka	
1	Vyložení drážky	$2 \cdot 0,15$	0,3	$3 \cdot 0,15$	0,45
2	Izolace proti železu	$2 \cdot t_i \rightarrow 2 \cdot 3$	6,0	$4 \cdot t_i \rightarrow 4 \cdot 3$	12,00
3	Tmelení	$2 \cdot 0,1$	0,2	$4 \cdot 0,1$	0,40
4	Stažení vodičů	$2 \cdot 0,15$	0,3	$4 \cdot 0,15$	0,60
5	Izolace závitů	$2 \cdot 0,48$	0,96	$2 \cdot n_d \cdot 0,48 \rightarrow 2 \cdot 10 \cdot 0,48$	9,60
6	Izolace vodičů	$1 \cdot j \cdot 0,37 \rightarrow 1 \cdot 2 \cdot 0,37$	0,74	$n_d \cdot i \cdot 0,37 \rightarrow 10 \cdot 4 \cdot 0,37$	14,80
7	Mezivrstva	-	-	$1 \cdot m_v \rightarrow 1 \cdot 4$	4,00
8	Σ izolace		8,50		41,85
9	Vůle na šířku	0,2 až 0,6	0,50	-	-
10	Holý vodič	$j \cdot b \rightarrow 2 \cdot 9$	18,00	$n_d \cdot i \cdot h_v \rightarrow 10 \cdot 4 \cdot 1,6$	64,00
11	Vložka na dno	-	-	$1 \cdot 1,00$	1,00
12	Vložka pod klín	-	-	$1 \cdot 0,5$	0,5
13	Vůle na hloubku	-	-	0,4 až 2,0	0,65
14	Rozměr drážky bez klínu	b_d	27	h_2	108,00
15	Klín + můstek	-	-	$h_0 + h_1 \rightarrow 1 + 6$	7,0
16	Konečný rozměr drážky	b_d	27	h_d	115,00

S ohledem na napětí 6,3 kV jsem zvolil izolaci proti železu $t_i = 3,0$ mm a mezivrstvu $m_v = 4,0$ mm [2, str. 6].

4.3.2 Rozměry vodiče vinutí induktu

Proudová hustota ve vodiči jsem určil z následujícího empirického vztahu:

$$\sigma_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{190}{18}} = 3,25 \text{ A/mm}^2 \quad (56)$$

kde:

K je konstanta závislá na napětí, pro $U = 6,3$ kV $\Rightarrow K = 190$ [2, str. 7]

b_v je šířka holého vodiče v drážce [řádka 10 v tab. 3]

Průřez vodiče:

$$S'_{cu1} = \frac{I_1}{a_{\approx} \cdot \sigma_{cu1}} = \frac{733}{2 \cdot 3,25} = 113 \text{ mm}^2 \quad (57)$$

Výška vodiče h_v při jeho šířce 18 mm:

$$h_v = \frac{S'_{cu1}}{b_v} = \frac{113}{18} = 6,28 \text{ mm} \quad (58)$$

Pro nutnost omezení ztrát, které by ve vodiči vznikly skinovým efektem, jsem tento vodič rozdělil na několik paralelních vodičů menších průřezů. Tyto vodiče jsem zvolil podle normalizovaného rozměru.

Původní vodič jsem tedy rozdělil na šířku na dva vodiče ($j=2$) a na výšku na čtyři vodiče ($i=4$). Rozměry vodiče jsem zvolil dle tabulky (příloha č. 5):

Rozměry holého vodiče:

$$h_v = 9 \text{ mm}$$

$$b_v = 1,6 \text{ mm}$$

Rozměry izolovaného vodiče:

$$h_{vi} = 9,5 \text{ mm}$$

$$b_{vi} = 2,1 \text{ mm}$$

Skutečný průřez jednoho vodiče je dle ČSN (příloha č. 5):

$$S_1 = 14,1 \text{ mm}^2$$

Výsledný průřez vodičů tvořícího jeden závit je:

$$S_{Cu1} = j \cdot i \cdot S_1 = 2 \cdot 4 \cdot 14,1 = 112,8 \quad (59)$$

Skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{cu1} = \frac{I_1}{a_{\approx} \cdot S_{Cu1}} = \frac{733}{2 \cdot 112,8} = 3,25 \text{ A/mm}^2 \quad (60)$$

4.4 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

4.4.1 Rozměry čel statorového vinutí

Vzdálenost mezi čely volím v závislosti na velikosti napětí:

$$c = 4 + \frac{U[kV]}{2} = 4 + \frac{6,3}{2} = 7,15 \text{ mm} \quad (61)$$

Šířku čela b_{ε} volím stejnou jako šířku drážky b_d

$$b_{\varepsilon} = b_d = 27 \text{ mm}$$

Úhel sklonu čel válcového vinutí:

$$\sin \alpha_{\varepsilon} = \frac{b_{\varepsilon} + c}{t_{d1}} = \frac{27 + 7,15}{58,3} = 0,586 \quad (62)$$

$$\alpha_{\varepsilon} = \arcsin 0,586 = 36^{\circ} \quad (63)$$

Délka vinutí mezi okem a výběhem cívký:

$$x = \frac{\beta t_p}{2 \cos \alpha_{\varepsilon}} = \frac{0,83 \cdot 559}{2 \cdot \cos 36^{\circ}} = 287 \text{ mm} \quad (64)$$

Vnitřní poloměr ohybu čela. Udává se v rozmezí (6 ÷ 10 mm).

$$\text{volím } r = 9 \text{ mm}$$

Střední poloměr ohybu čela:

$$R = \frac{h_2}{2} + r = \frac{108}{2} + 9 = 63 \text{ mm} \quad (65)$$

Délka oblouku čela:

$$B = R + r = 63 + 9 = 72 \text{ mm} \quad (66)$$

Délka oka:

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 63}{2} = 99 \text{ mm} \quad (67)$$

Délka osy vinutí mezi okem a výběhem z cívky:

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \operatorname{tg} \alpha_c = \frac{0,83 \cdot 559}{2} \operatorname{tg} 36^\circ = 169 \text{ mm} \quad (68)$$

Vyložení čel:

$$E = v + y + B = 50 + 169 + 72 = 291 \text{ mm} \quad (69)$$

kde:

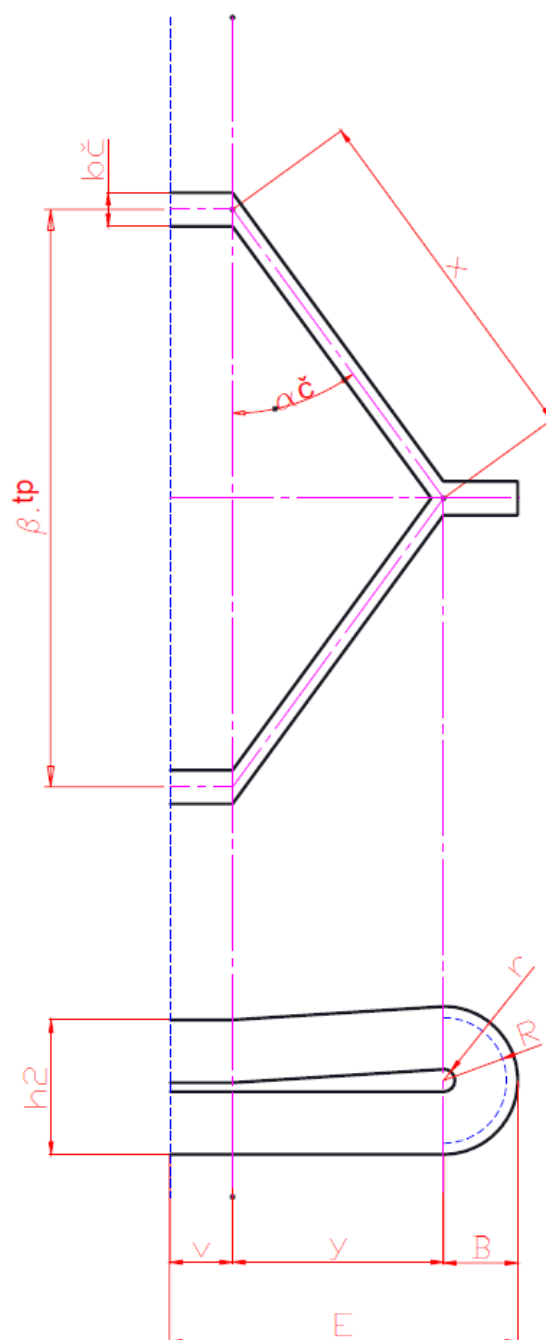
v je výběh drážky z cívky. Pro napětí 6,3 kV volím $v = 50 \text{ mm}$ [2, str. 8]

Délka čela:

$$l_c = 2(v + x + o) = 2(0,05 + 0,287 + 0,099) = 0,872 \text{ m} \quad (70)$$

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_c = 0,961 + 0,872 = 1,833 \text{ m} \quad (71)$$



Obr. 9 Čelo statorového vinutí

4.4.2 Odpor jedné fáze statorového vinutí

Elektrický odpor pro stejnosměrný proud bez uvažování skinefektů:

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{\approx} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 1,833 \cdot 80}{2 \cdot 112,8} = 0,023 \text{ } \Omega \quad (72)$$

kde

ρ_{Cu} je měrný odpor měděného vodiče při teplotě 20 °C $\left[\Omega \frac{m}{mm^2} \right]$

Vliv skinefektů:

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2 \cdot \pi \cdot h_v \cdot \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f}{b_d \cdot \rho} 10^{-7}} = 2 \cdot \pi \cdot 1,6 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9 \cdot 50}{27 \cdot \frac{1}{56}} \cdot 10^{-7}} = 0,137 \quad (73)$$

Celkový počet vodičů v drážce nad sebou:

$$g = i \cdot n_d = 4 \cdot 10 = 40 \quad (74)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4 = \frac{40^2 - 0,2}{9} \cdot 0,137^4 = 0,063 \quad (75)$$

Hodnota k_{Cu} je přiměřená, pokud je menší než 0,2 [2, str. 8].

Odpor při střídavém proudu při 20 °C:

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) \cdot R'_{1/20} = (1 + 0,063) \cdot 0,023 = 0,024 \text{ } \Omega \quad (76)$$

Odpor při střídavém proudu při 75 °C:

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,024 = 0,029 \text{ } \Omega \quad (77)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,029 \cdot 733}{3637} \cdot 100 = 0,58 \text{ } \% \quad (78)$$

4.4.3 Rozptylová reaktance statorového vinutí

$$\begin{aligned}
 X_{\sigma} &= \frac{(4\pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot l_e \left[\left(\frac{h'_2}{3b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_{\check{c}}}{l_e} \cdot q \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_{\check{c}}} \cdot \beta \right) + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2b_d} \right) \right] \cdot 10^{-7} = \\
 &= \frac{(4\pi)^2 \cdot 50 \cdot 80^2}{5 \cdot 3,2} \cdot 0,811 \cdot \\
 &\cdot \left[\left(\frac{100,35}{3 \cdot 27} + \frac{11}{27} \right) + \frac{0,864}{0,811} \cdot 3,2 \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,559}{0,864} \cdot 0,83 \right) + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot 31,3}{2 \cdot 27} \right) \right] \cdot 10^{-7} = 0,92 \ \Omega
 \end{aligned}
 \tag{79}$$

kde:

$$h'_1 = h_0 + h_1 + \text{izolace Fe} + \text{vložka na dno} = 1 + 6 + 3 + 1 = 11 \text{ mm}$$

$$h'_2 = h_2 - \text{vule na hloubku} - \text{vložka na dno} - 2 \cdot \text{izolace Fe} = 108 - 0,65 - 1 - 2 \cdot 3 = 100,35 \text{ mm}$$

(80, 81)

Úbytek napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,92 \cdot 733}{3637} \cdot 100 = 18,5 \%$$

(82)

Procentní hodnota rozptylové reaktance:

$$x_{\sigma} = u_{\sigma} = 18,5 \%$$

(83)

4.5 Návrh magnetického obvodu

Magnetický obvod stroje je tvořen železem rotoru a statoru a vzduchovou mezerou mezi oběma těmito částmi. Jedná se o důležité části stroje, neboť těmito částmi prochází požadovaný magnetický tok.

4.5.1 Výpočet magnetického toku

Výpočet magnetického toku jsem odvodil ze vzorce pro indukované napětí:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{3637}{4,44 \cdot 50 \cdot 80 \cdot 0,921} = 0,222 \text{ Vs}$$

(84)

Podle rozměru stroje a velikosti magnetické indukce ve vzduchové mezeře jsem si ověřil hodnotu magnetického toku:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_\delta = \frac{2}{\pi} \cdot 0,559 \cdot 0,811 \cdot 0,77 = 0,222 \text{ Vs} \quad (85)$$

Hodnoty jsou totožné, a tedy pokračuji dále s touto hodnotou:

$$\Phi = 0,222 \text{ Vs}$$

4.5.2 Velikost vzduchové mezery

Požadavek na vzduchovou mezeru je takový, aby byla co nejmenší, neboť klade magnetickému toku odpor. V případě velké vzduchové mezery by bylo nutné vytvořit silnější magnetický tok zvětšením budícího proudu. Vzduchovou mezeru nelze z konstrukčních důvodů příliš zmenšovat, a to z důvodu obtížné montáže uložení rotoru a správné funkce stroje.

Při její volbě vycházím z požadované procentní hodnoty nesyčené synchronní reaktance a procentní hodnoty rozptylové reaktance.

Velikost vzduchové mezery:

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = 47 \cdot \frac{62918 \cdot 0,559}{0,77} \cdot \frac{10^{-6}}{127 - 18,5} = 0,0198 \text{ m} \quad (86)$$

kde:

k závisí na tvaru pólového nástavce, velikosti Cartérova činitele a dalších parametrech. Udává se v rozmezí (43÷50). Volím $k = 47$.

x_d je procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance. Pokud není zadána, volí se podle počtu pólů. Volím $x_d = 127$ [2, str. 11].

Velikost výsledné vzduchové mezery volím:

$$\delta = 20,0 \text{ mm}$$

Za účelem pokud možného sinusového průběhu ve vzduchové mezeře volím po obvodu proměnnou velikost vzduchové mezery:

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5 \quad (87)$$

Na okrajích pólových nástavců je velikost vzduchové mezery $1,5 \div 2$ krát větší než v ose pólu.

4.5.3 Magnetické napětí reakce kotvy

Činitel základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Hodnoty jsem odečetl z grafu (příloha č. 7):

$$C_1 = a \cdot b = 1,18 \cdot 0,915 = 1,08 \quad (88)$$

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,08} \cdot 62918 \cdot 0,559 \cdot 0,921 = 13502 \text{ A} \quad (89)$$

Deformační činitel magnetického napětí v podélné ose C_{d1} . Hodnoty jsem odečetl z grafu (příloha č. 6):

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,815 \cdot 1,09 = 0,89 \quad (90)$$

Deformační činitel magnetického napětí v příčné ose C_{q1} . Hodnoty jsem odečetl z grafu (příloha č. 6):

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,52 \cdot 0,33 = 0,50 \quad (91)$$

Amplituda základní harmonické magnetického napětí v podélné ose F_{d1} :

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,89 \cdot 13502 = 12017 \text{ A} \quad (92)$$

Amplituda základní harmonické magnetického napětí v příčné ose F_{q1} :

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,50 \cdot 13502 = 6751 \text{ A} \quad (93)$$

příčemž, pro:

$$\delta_{\max} / \delta = 1,5 \quad (94)$$

$$\delta / t_p = 20,0 / 559 = 0,036 \quad (95)$$

$$\alpha = 0,7 \quad (96)$$

4.5.4 Dimenzování magnetického obvodu

Dimenzováním magnetického obvodu se rozumí určení vhodného průřezů železných částí statoru a rotoru, kdy při výpočtech vycházíme z velikosti magnetického toku a požadované hodnoty magnetické indukce.

výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,559 = 0,168 \text{ m} \quad (97)$$

Výška pólového nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,559 = 0,056 \text{ m} \quad (98)$$

Délka pólů je stejná jako celková délka induktu (včetně radiálních ventilačních kanálů):

$$L_p = L = 0,961 \text{ m} \quad (99)$$

Šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1+\nu) \cdot \Phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1+0,15) \cdot 0,222}{1,5 \cdot 0,961} = 0,177 \text{ m} \quad (100)$$

kde:

B_p je hodnota magnetické indukce v pólu. Udává se v rozmezí (1,5 ÷ 1,7) T. Volím

$$B_p = 1,5 \text{ T}.$$

ν je předpokládaná poměrná hodnota mezipólového rozptylového toku. Volím $\nu = 0,15$.

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,7 \cdot 0,559 = 0,391 \text{ m} \quad (101)$$

Šířka mezery budící cívky:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,391 - 0,177}{2} = 0,107 \text{ m} \quad (102)$$

Délka rotoru:

$$L_r = L + \frac{a}{2} = 0,961 + \frac{0,107}{2} = 1,01 \text{ m} \quad (103)$$

výška jhu rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,222}{2 \cdot 1,1 \cdot 1,01} = 0,115 \text{ m} \quad (104)$$

kde:

B_{jr} je hodnota magnetické indukce ve jhu rotoru. Udává se v rozmezí (0,9 ÷ 1,2) T. Volím

$$B_{jr} = 1,1 \text{ T}$$

L_r je délka rotoru, proti délce pólu zvětšená s ohledem na prostor pro dosednutí budící cívky

konstanta k_{Fe} :

$$\text{volím} = 0,92$$

výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,222}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,811} = 0,114 \text{ m} \quad (105)$$

kde:

B_{js} je hodnota magnetické indukce ve jhu statoru. Udává se v rozmezí (1,2 ÷ 1,4) T.

Volím $B_{js} = 1,3 \text{ T}$

4.5.5 Délky středních siločar částí magnetického obvodu

pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,168 + 0,056 = 0,224 \text{ m} \quad (106)$$

jho rotoru:

$$l_r = \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (\delta + h_p + h_n)]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [1,78 - 2 \cdot (0,02 + 0,168 + 0,056)]}{4 \cdot 5} = 0,203 \text{ m} \quad (107)$$

jádro induktu:

$$l_s = \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [1,78 - 2 \cdot (0,115 + 0,114)]}{4 \cdot 5} = 0,21 \text{ m} \quad (108)$$

4.5.6 Charakteristika naprázdno

Cartéřův činitel respektující vliv drážkování induktu k_{cd}

$$\frac{b_o}{z_1} = \frac{27}{31,3} = 0,86 \quad b_o = b_d \quad \text{platí pro otevřenou drážku} \quad (109)$$

$$\frac{b_o}{\delta} = \frac{27}{20} = 1,35 \quad (110)$$

Z nomogramu dle přílohy č. 8 volím: $k_{cd} = 1,1$

Cartéřův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů k_{ck} :

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{20}{2 + 20} \cdot \frac{10 \cdot 16}{811}} = 0,85 \quad (111)$$

kde:

\check{s}_k je šířka radiálního kanálu

i je počet paketů

Výsledná hodnota Cartérova činitele:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,1 \cdot 0,85 = 0,94 \quad (112)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,94 \cdot 0,02 \cdot 0,77 \cdot 10^6 = 11581 \text{ A} \quad (113)$$

Výpočet charakteristiky naprázdno je proveden v následujících tabulkách.

4.6 Magnetizační charakteristika

4.6.1 Magnetizační charakteristika zubové vrstvy

Tab. 4 Magnetizační charakteristika zubové vrstvy

D_1	$D_1=1780$	$t_{d1}=58,25$	$z_1=31,25$	$k_{z1}=1,03$	$B'_{z1}=1,56$	$B_{z1}=1,55$	$H_{z1}=2300$		
$D_2=D_1 \pm h_d$	$D_2=1895$	$t_{d2}=62,01$	$z_2=35,01$	$k_{z2}=0,93$	$B'_{z2}=1,48$	$B_{z2}=1,47$	$H_{z2}=1400$	$H_{str}=1475$	$F_z=170$
$D_3=D_1 \pm 2h_d$	$D_3=2010$	$t_{d3}=65,78$	$z_3=38,78$	$k_{z3}=0,84$	$B'_{z3}=1,42$	$B_{z3}=1,41$	$H_{z3}=950$		
k_1 1,15	$i=1, 2, 3$ + stator - rotor	$t_{di} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q}$ $k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i \cdot k_{F\delta}} - 1$	$z_i = t_{di} - b_d$ $B'_{zi} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{z_i \cdot k_{F\delta}}$	$k_1 \cdot \Phi$	$B'_{z1}=1,79$ $B'_{z2}=1,70$ $B'_{z3}=1,64$	$B_{z1}=1,77$ $B_{z2}=1,69$ $B_{z3}=1,63$	$H_{z1}=9500$ $H_{z2}=6000$ $H_{z3}=4000$	$H_{str}=6250$	$F_z=719$
k_2 1,3		$H_{zstr} = \frac{H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3}}{6}$	$F_z = H_{zstr} \cdot h_d$	$k_2 \cdot \Phi$	$B'_{z1}=2,03$ $B'_{z2}=1,92$ $B'_{z3}=1,85$	$B_{z1}=1,97$ $B_{z2}=1,89$ $B_{z3}=1,83$	$H_{z1}=20400$ $H_{z2}=17000$ $H_{z3}=13500$	$H_{str}=16983$	$F_z=1953$

4.6.2 Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu

Tab. 5 Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu

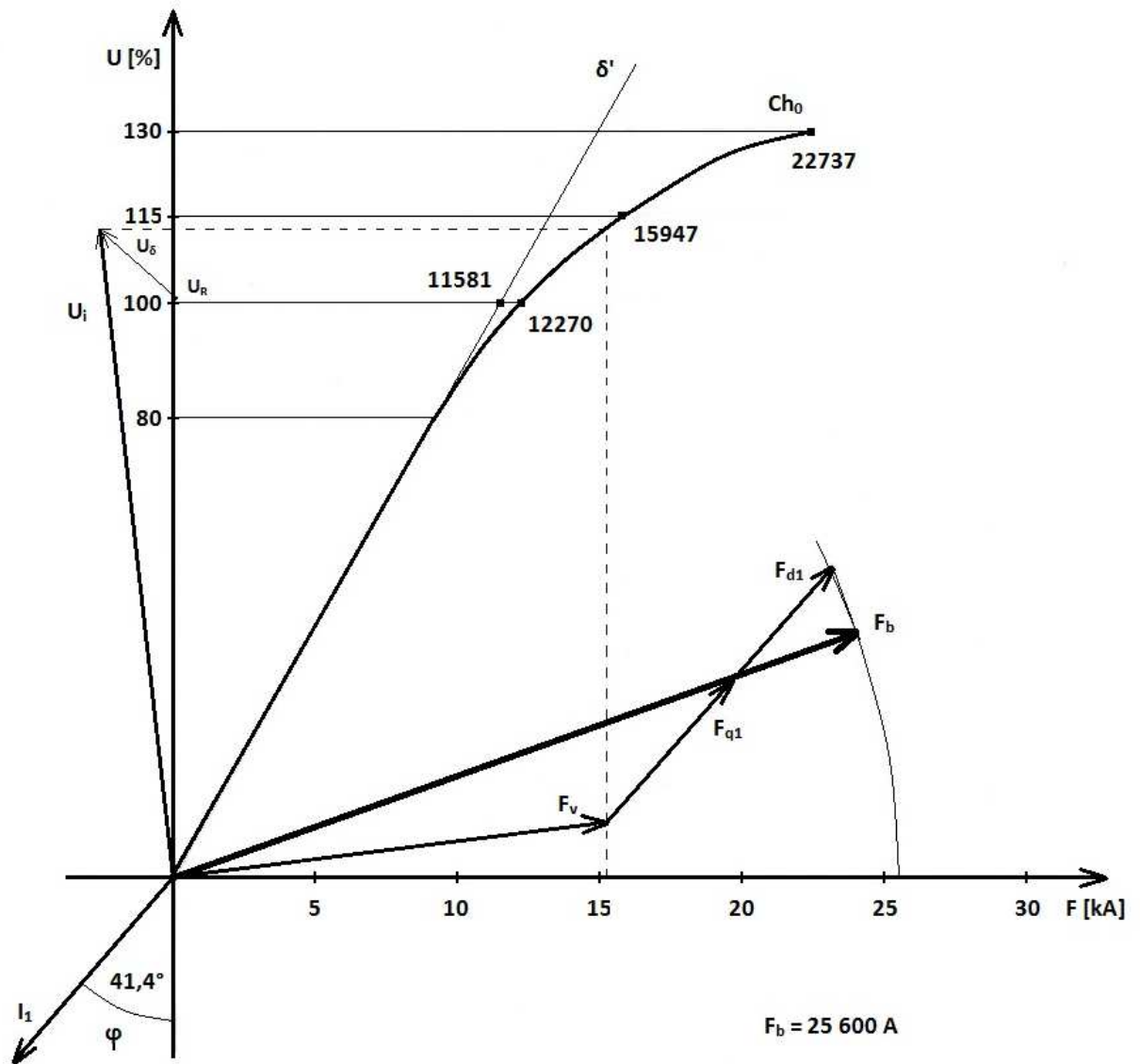
		Φ			$k_1\Phi$			$k_2\Phi$			
		B	H	F	B	H	F	B	H	F	
Vzduch.mezera	$\delta = 0,02 \text{ m}$	0,77		11581			13318			15055	
Z	Hlava	$k_{z1} = 1,03$	B'_{z1}	1,56	2300		1,79	9500		2,03	20400
			B_{z1}	1,55			1,77			1,97	
U	Střed	$k_{z2} = 0,93$	B'_{z2}	1,48	1400		1,70	6000		1,92	17000
			B_{z2}	1,47			1,69			1,89	
Y	Pata	$k_{z3} = 0,84$	B'_{z3}	1,42	950		1,64	4000		1,85	13500
			B_{z3}	1,41			1,63			1,83	
Stř.hodnota		$h_d = 0,115$		1475	170		6250	719		16983	1953
Jádro induktu		$l_s = 0,210$	1,30	630	132	1,50	1600	336	1,69	6000	1260
Pól		$l_p = 0,224$	1,48	1400	314	1,70	6500	1456	1,92	19000	4256
Jho		$l_r = 0,203$	1,10	360	73	1,27	580	118	1,43	1050	213
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_j + F_p + F_{ji}$			12270			15947			22737		

Při výpočtech jsem použil magnetizačních křivek (přílohy č. 9, 10) a činitel odlehčení (příloha č. 11).

4.6.3 Charakteristika naprázdno

Průběh charakteristiky naprázdno jsem znázorněn na obr. 10. Na vodorovnou osu jsem vynesl magnetické napětí $F [A]$, které je úměrné budícímu proudu. Na svislé ose jsem vynesl elektrického napětí $U [V]$, jejichž hodnoty jsem uvedl v procentech. [12].

Hodnoty pro sestrojení charakteristiky naprázdno jsem získal z tabulky č. 5. Hodnota výsledného magnetického napětí F_b na základě sestrojené charakteristiky je ve výši 25600 A.



Obr. 10 Charakteristika naprázdno

4.7 Návrh budícího vinutí

4.7.1 Rozměry pólového nástavce s parametry budící cívky

Přesahující část pólového nástavce:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,391 - 0,177}{2} = 0,107 \text{ m} \quad (114)$$

Předběžná střední délka závitů budicí cívky:

$$l_{bs} = 2 \cdot (L_p + b_p + 2a) = 2 \cdot (0,961 + 0,177 + 2 \cdot 0,107) = 2,704 \text{ m} \quad (115)$$

Průřez vodiče budicí cívky:

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2p \cdot F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{\frac{1}{56} \cdot 2,704 \cdot 10 \cdot 25600}{0,9 \cdot 400} = 34,34 \text{ mm}^2 \quad (116)$$

kde:

F_b je magnetické napětí budicího vinutí

U_b je budicí napětí, které jsem zvolil 400 V

Rozměry vodiče jsem zvolil dle tabulky (příloha č. 5):

Rozměry holého vodiče:

$$h_v = 8 \text{ mm}$$

$$b_v = 4,5 \text{ mm}$$

Rozměry izolovaného vodiče:

$$h_{vi} = 8,4 \text{ mm}$$

$$b_{vi} = 4,9 \text{ mm}$$

Skutečný průřez vodiče (při respektování zaoblení hran a nerovnosti povrchu):

$$S_{Cub} = 34,8 \text{ mm}^2$$

Volím proudovou hustotu ve vodiči : $\sigma_{Cub} = 2 \text{ A/mm}^2$

Budicí proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 2 \cdot 34,8 = 69,6 \text{ A} \quad (117)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{25600}{69,6} = 368 \quad (118)$$

Volím tloušťku kostřičky cívky:

$$t_{kc} = 5 \text{ mm}$$

Předběžná šířka budící cívky:

$$a_n = \frac{b_n - b_p}{2} - t_{kc} = \frac{0,391 - 0,177}{2} - 0,005 = 0,102 \text{ m} \quad (119)$$

Počet poloh budící cívky:

$$n_p = \frac{a_n}{h_{vi}} = \frac{102}{8,4} = 12,14 \quad \text{volím } n_p = 12 \quad (120)$$

Šířka budící cívky:

$$b_c = h_{vi} \cdot n_p = 8,4 \cdot 12 = 100,8 \text{ mm} \quad (121)$$

Počet závitů v jedné poloze:

$$N'_{p1} = \frac{N_b}{n_p} = \frac{368}{12} = 30,67 \quad \text{volím } N'_{p1} = 31 \quad (122)$$

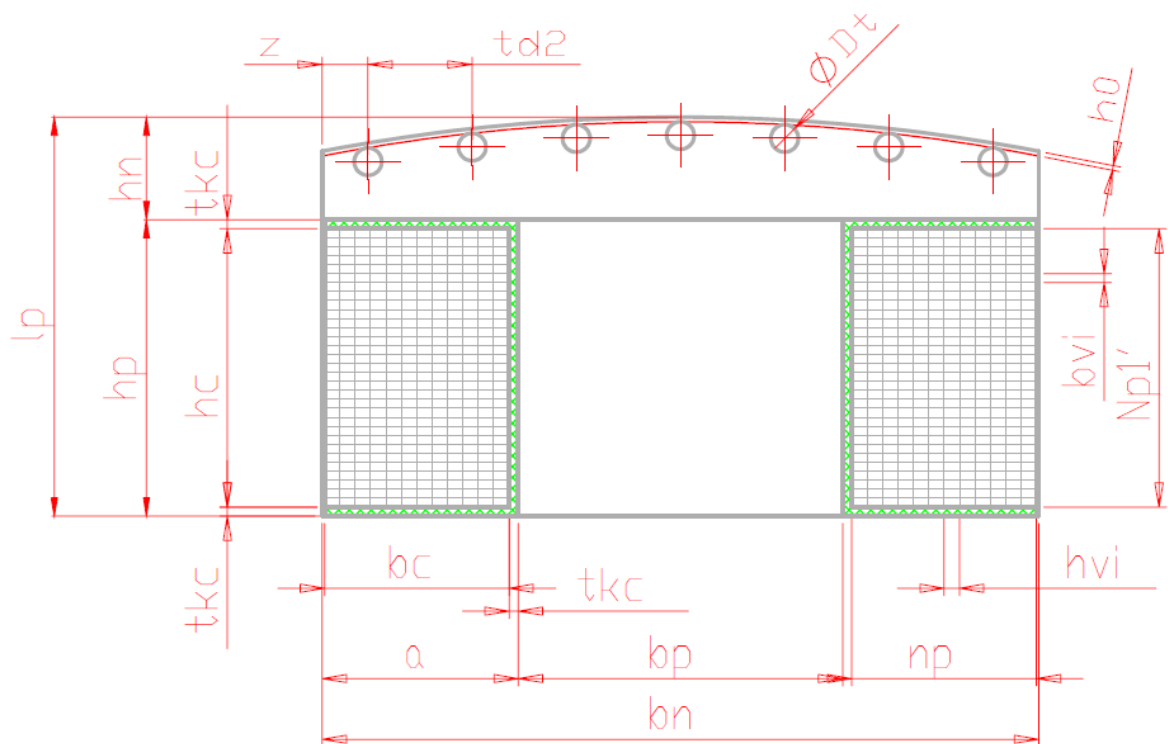
Výška budící cívky:

$$h_c = N'_{p1} \cdot b_{vi} = 31 \cdot 4,9 = 152 \text{ mm} \quad (123)$$

Výška těla pólu:

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_{kc} = 152 + 2 \cdot 5 = 162 \text{ mm} \quad (124)$$

Skutečná výška pólu vychází téměř stejná, jako byla odhadovaná velikost pólu (vztah 97. $h_p=168 \text{ mm}$). Nově vypočtené hodnotě přizpůsobím výšku pólu.



Obr. 11 Vyniklý pól synchronního stroje

4.7.2 Orientační výpočet oteplení budící cívky

Vnější obvod budící cívky:

$$l_{be} = 2 \cdot [L_p + b_p + 4 \cdot (b_c + t_{kc})] = 2 \cdot [0,961 + 0,177 + 4 \cdot (0,1008 + 0,005)] = 3,122 \text{ m} \quad (125)$$

Střední obvod budící cívky:

$$l_{bs} = 2 \cdot \left[L_p + b_p + 4 \cdot \left(t_{kc} + \frac{b_c}{2} \right) \right] = 2 \cdot \left[0,961 + 0,177 + 4 \cdot \left(0,005 + \frac{0,1008}{2} \right) \right] = 2,719 \text{ m} \quad (126)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_c \cdot l_{be} \cdot 2p = 0,152 \cdot 3,122 \cdot 10 = 4,75 \text{ m}^2 \quad (127)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2,719 \cdot 368 \cdot 10}{34,8} = 6,26 \ \Omega \quad (128)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 6,26 \cdot 69,6^2 = 30324 \ W \quad (129)$$

Rychlost proudícího vzduchu kolem cívky, lze uvažovat jako třetinu obvodové rychlosti rotoru:

$$v = \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot 1,78 \cdot 600}{60} = 18,64 \ m/s \quad (130)$$

Součinitel přestupu tepla jsem určil podle grafu (příloha č. 12):

$$\alpha = 98 \ W / ^\circ C \cdot m^2$$

Oteplení cívky:

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha \cdot O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 30324}{98 \cdot 4,75} = 76,8 \ ^\circ C \quad (131)$$

Hodnota odpovídá použité izolaci třídy „B“.

4.8 Ztráty a účinnost

Při práci hydroalternátoru vznikají ztráty. Částí přiváděného příkonu se pokryjí ztráty, které se přemění v teplo. Jedná se zejména o ztráty ve vodičích vlivem činného odporu, dále ztráty vzniklé v železe a mechanické ztráty zapříčiněné třením v ložiskách.

4.8.1 Jouleovy ztráty

Jedná se o největší ztráty, které vznikají ve vinutích statoru průchodem střídavého proudu a ve vinutí rotoru průchodem stejnosměrného proudu.

Ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{1/75} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,029 \cdot 733^2 = 46744 \text{ W} \quad (132)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 6,26 \cdot 69,6^2 = 30324 \text{ W} \quad (133)$$

Již bylo určeno při výpočtu oteplení budící cívky (vztah 129).

4.8.2 Ztráty v železe

Jedná se o ztráty hysterezní a ztráty způsobené vířivými proudy. Jejich velikost závisí na kvalitě a síle použitých elektrotechnických plechů, frekvenci přemagnetování a velikosti magnetické indukce.

Ztráty v jádře induktu:

Ztrátové číslo plechů:

$$\Delta p_{Fe} = 1,8 \text{ W / kg}$$

Vnější průměr statoru:

$$D_{je} = D_1 + 2(h_d + h_{js}) = 1,78 + 2(0,115 + 0,114) = 2,238 \text{ m} \quad (134)$$

Hmotnost jádra statoru:

$$m_{Fej} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{je}^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \sigma_{Fe} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,238^2 - 2,01^2) \cdot 0,811 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 4427 \text{ kg} \quad (135)$$

kde:

$$D_3 = D_{je} - 2(h_{js}) = 2,238 - 2(0,114) = 2,01 \text{ m} \quad (136)$$

Ztráty v jádře induktu (statoru):

$$\Delta P_{Fej} = 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} = 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 4427 = 24241 \text{ W} \quad (137)$$

Ztráty v zubech statoru:

Hmotnost zubů statoru:

$$m_{Fez} = Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 96 \cdot 0,035 \cdot 0,115 \cdot 0,811 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 2249 \text{ kg} \quad (138)$$

kde:

z_2 je střední šířka zubu (viz. výpočet zubové vrstvy charakteristiky naprázdno)

h_d hloubka drážky

Ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{Fez} = 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,47^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 2249 = 17496 \text{ W} \quad (139)$$

kde:

B_{z2} je magnetická indukce ve středu zubu (viz. výpočet zubové vrstvy charakteristiky naprázdno)

4.8.3 Ztráty povrchové

Při zatížení stroje i při chodu naprázdno dochází ke kolísání indukce ve vzduchové mezeře v důsledku drážkování statoru. Toto drážkování statoru je příčinou vzniku povrchových ztrát na povrchu pólových nástavců rotoru.

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c)^2 = \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot 1,78 \cdot 0,7 \cdot 0,961 \cdot 4,6 \cdot \left(\frac{96 \cdot 600}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,058 \cdot 0,08 \cdot 1000 \cdot 0,77 \cdot 0,94)^2 = 1349 \text{ W} \end{aligned} \quad (140)$$

kde:

k_0, β jsou činitele povrchových ztrát (určeno z grafu dle přílohy č. 13)

k_c je Cartérův činitel (vztah 112)

4.8.4 Ztráty mechanické

Mechanické ztráty vznikají v důsledku tření rotujících částí stroje o vzduch, třením v ložiskách a třením na kroužkách rotoru.

Obvodová rychlost rotoru:

$$v = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,78 \cdot 600}{60} = 55,92 \text{ m/s} \quad (141)$$

Ztráty mechanické:

$$\Delta P_m = v^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 55,92^{2,5} \cdot 1,78 \cdot \sqrt{0,811} = 37484 \text{ W} \quad (142)$$

4.8.5 Ztráty přídatné (dodatečné)

Přídatné (dodatečné) ztráty vznikají vlivem vyšších harmonických kmitočtů magnetického pole rotoru. Tato magnetická indukce vytváří vířivé proudy v železe statoru i v pólových nástavcích rotoru. Tyto ztráty se těžko definují.

Ztráty přídatné:

$$\Delta P_{přid} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 8000 \cdot 10^3 = 24000 \text{ W} \quad (143)$$

4.8.6 Ztráty celkové

Ztráty celkové jsou dány součtem všech výše stanovených ztrát (viz vztahy 132, 133, 137, 139, 140, 142 a 143).

Ztráty celkové:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{přid} = 46744 + 30324 \\ &+ 24241 + 17496 + 1349 + 37484 + 24000 = 181638 \text{ W} = 181,638 \text{ kW} \end{aligned} \quad (144)$$

4.8.7 Účinnost

Účinnost stroje se vyjadřuje jako poměr výkonu stroje a dodávaného příkonu z turbíny, nebo se udává v procentech. Je vždy menší než 1, nebo méně než 100 % a to v důsledku ztrát.

Účinnost stroje:

$$\eta = \left(\frac{P}{P + \Delta P} \right) \cdot 100 = \left(\frac{6000}{6000 + 181,638} \right) \cdot 100 = 97,1 \% \quad (145)$$

5 Konstrukční části a mechanické výpočty stroje

5.1 Výpočet rozměrů hřídele

Průměr hřídele v nejužším místě (uložení rotorového svazku):

$$d_h = k_h \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n}} = 0,182 \cdot \sqrt[3]{\frac{6000}{600}} = 0,39 \text{ m} \quad (146)$$

kde:

k_h je součinitel, kdy jeho velikost je závislá na výkonu stroje. Pro daný výkon stroje se podle Kopylova [5, str. 538] udává v rozmezí (0,18 ÷ 0,20). Volím $k_h = 0,182$.

Průměr hřídele v nejširším místě:

$$D_h = (1,3 \div 2) \cdot d_h = 1,32 \cdot 0,39 = 0,51 \text{ m} \quad (147)$$

5.2 Výpočet rozměrů kladiva

Objem pólového nástavce:

$$V_n = \frac{2}{3} \cdot h_n \cdot b_n \cdot L_p = \frac{2}{3} \cdot 0,056 \cdot 0,391 \cdot 0,961 = 0,014 \text{ m}^3 \quad (148)$$

Objem pólu:

$$V_p = h_p \cdot b_p \cdot L_p = 0,162 \cdot 0,177 \cdot 0,961 = 0,0276 \text{ m}^3 \quad (149)$$

Objem cívký budícího vinutí:

$$V_c = h_p \cdot a \cdot l_{bs} = 0,162 \cdot 0,107 \cdot 2,719 = 0,0471 \text{ m}^3 \quad (150)$$

Hustota železa:

$$\rho_{Fe} = 7800 \text{ kg / m}^3$$

Hmotnost pólového nástavce:

$$m_n = V_n \cdot \rho_{Fe} = 0,014 \cdot 7800 = 109,2 \text{ kg} \quad (151)$$

Hmotnost pólu:

$$m_p = V_p \cdot \rho_{Fe} = 0,0276 \cdot 7800 = 215,28 \text{ kg} \quad (152)$$

Hustota mědi:

$$\rho_{Cu} = 8900 \text{ kg / m}^3$$

Hmotnost cívký budícího vinutí:

$$m_c = V_c \cdot \rho_{Cu} = 0,0471 \cdot 8900 = 419,19 \text{ kg} \quad (153)$$

Poloměr pólového nástavce (měřeno od středu stroje):

$$r_n = \frac{D_1}{2} - \left(\delta + \frac{2}{3} \cdot h_n \right) = \frac{1,78}{2} - \left(0,02 + \frac{2}{3} \cdot 0,056 \right) = 0,83 \text{ m} \quad (154)$$

Poloměr pólu (měřeno od středu stroje):

$$r_p = \frac{D_1}{2} - \left(\delta + h_n + \frac{1}{2} \cdot h_p \right) = \frac{1,78}{2} - \left(0,02 + 0,056 + \frac{1}{2} \cdot 0,162 \right) = 0,733 \text{ m} \quad (155)$$

Poloměr cívky budícího vinutí (měřeno od středu stroje):

$$r_c = r_p = \frac{D_1}{2} - \left(\delta + h_n + \frac{1}{2} \cdot h_p \right) = \frac{1,78}{2} - \left(0,02 + 0,056 + \frac{1}{2} \cdot 0,162 \right) = 0,733 \text{ m} \quad (156)$$

Rychlost otáčení rotoru:

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{600}{60} = 62,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (157)$$

$$\omega_{max} = 1,2 \cdot \omega = 1,2 \cdot 62,83 = 75,396 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (158)$$

Odstředivá síla pólového nástavce:

$$F_n = m_n \cdot r_n \cdot \omega_{max}^2 = 109,2 \cdot 0,83 \cdot 75,396^2 = 515225 \text{ N} \quad (159)$$

Odstředivá síla pólu:

$$F_p = m_p \cdot r_p \cdot \omega_{max}^2 = 215,28 \cdot 0,733 \cdot 75,396^2 = 897024 \text{ N} \quad (160)$$

Odstředivá síla cívky budícího vinutí:

$$F_c = m_c \cdot r_c \cdot \omega_{max}^2 = 419,19 \cdot 0,733 \cdot 75,396^2 = 1746673 \text{ N} \quad (161)$$

Součet odstředivých sil:

$$F_{cc} = F_n + F_p + F_c = 515225 + 897024 + 1746673 = 3158922 \text{ N} \quad (162)$$

Odstředivá síla na jeden pól:

$$F_{cc1} = \frac{F_{cc}}{L_p} = \frac{3158922}{0,961} = 3287120 \text{ N} / \text{m} = 3,287 \text{ MN} / \text{m} \quad (163)$$

Volba rozměrů kladiva

Rozměry kladiva jsem zvolil dle normalizovaných rozměrů uvedených v tabulce 9.6, kde pro vypočtenou odstředivou sílu na jeden pól dle vztahu 163, tomuto odpovídá provařená rybina č. 5, která má dovolené zatížení $F_{cc1} = 3,340 \text{ MN} / \text{m}$ [5, str. 566].

Šířka krčku kladiva:

$$a = 0,038 \text{ m}$$

Šířka spodní části kladiva:

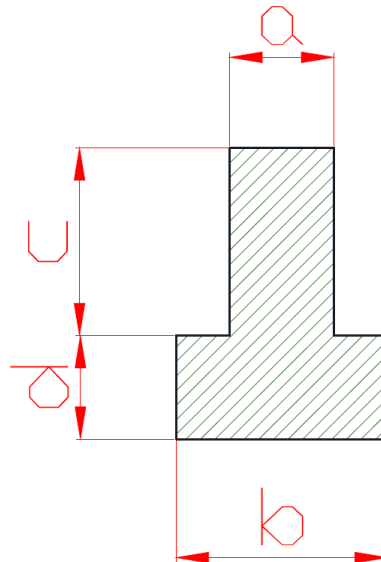
$$b = 0,070 \text{ m}$$

Výška krčku kladiva:

$$c = 0,058 \text{ m}$$

Výška rozšířené spodní části kladiva:

$$d = 0,32 \text{ m}$$



Obr. 12 Rozměry kladiva

Dovolené namáhání kladiva:

$$\sigma_{dov} = (120 \div 150) \text{ MPa}$$

Skutečné namáhání kladiva:

$$\sigma_A = \frac{F_{cc1}}{a} \leq \sigma_{dov} \quad (164)$$

$$\sigma_A = \frac{3,287}{0,038} = 86,5 \text{ MPa} \leq \sigma_{dov} \quad (165)$$

Maximální namáhání kladiva:

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= \frac{F_{cc1}}{a} \cdot \left[\frac{3 \cdot \left(\frac{b-a}{2} \right)}{4d} + \sqrt{1 + \left[\frac{3 \cdot \left(\frac{b-a}{2} \right)}{4d} \right]^2} \right] = \\ &= \frac{3,287}{0,038} \cdot \left[\frac{3 \cdot \left(\frac{0,070 - 0,038}{2} \right)}{4 \cdot 0,032} + \sqrt{1 + \left[\frac{3 \cdot \left(\frac{0,070 - 0,038}{2} \right)}{4 \cdot 0,032} \right]^2} \right] = 124,82 \text{ MPa} < \sigma_{dov} \end{aligned} \quad (166)$$

5.3 Návrh tlumícího vinutí

Výška krčku:

$$\text{volím } h_0 = 2,5 \text{ mm}$$

Proud v pólovém nastavci:

$$I_2 = \alpha \cdot t_p \cdot 0,2 \cdot A = 0,7 \cdot 0,559 \cdot 0,2 \cdot 62918 = 4924 \text{ A} \quad (167)$$

Počet tyčí na pól (s ohledem na velikost a další parametry pólu):

$$\text{volím } N_t = 7$$

Proud v tlumící tyči:

$$I_{2t} = \frac{I_2}{N_t} = \frac{4924}{7} = 703 \text{ A} \quad (168)$$

Průřez tyče:

$$S_t = \frac{I_{2t}}{\sigma_t} = \frac{703}{6} = 117,2 \text{ mm}^2 \quad (169)$$

Proudová hustota:

$$\text{volím } \sigma_t = 6 \text{ A/mm}^2$$

Průměr tyče:

$$D_t = 1,33 \cdot \sqrt{S_t} = 1,33 \cdot \sqrt{117,2} = 14,4 \text{ mm} \quad \text{volím } D_t = 15 \text{ mm} \quad (170)$$

Vzdálenost mezi středem krajní tyče a bočními stranami pólového nástavce:

$$\text{volím } z = 25 \text{ mm}$$

Drážková rozteč tyčí:

$$t_{d2} = \frac{b_n - D_t - 2 \cdot z}{N_t - 1} = \frac{391 - 15 - 2 \cdot 25}{7 - 1} = 54,3 \text{ mm} \quad (171)$$

Navržené tlumícího vinutí jsem graficky znázornil na obr. 9.

5.4 Příčný a podélný řez stroje

Na základě informací získaných z provedených výpočtů jsem mohl sestrojít navrhovaný synchronní stroj.

V programu AutoCAD jsem schematicky nakreslil příčný a podélný řez navrhovaného synchronního stroje. Technické výkresy s výše uvedenými řezy stroje jsou součástí přílohové části mé diplomové práce (přílohy 15. a 16.).

Závěr

Ve své diplomové práci jsem provedl elektromagnetický návrh synchronního generátoru dle zadaných parametrů. Vypočetl jsem, že účinnost stroje je 97,1 %.

Dále jsem vypočetl parametry vinutí statoru, určil jsem počet paralelních větví každé fáze $a_{\text{f}} = 2$, průřez vodičů, počet závitů v cívce a rozměry izolace. Součástí této části bylo i navržení drážky statoru. Navrhl jsem otevřené drážky tvaru M.

V poslední části této práce jsem schematicky nakreslil v programu AutoCAD příčný a podélný řez navrhovaného stroje v měřítku 1:20. Tímto jsem si ověřil správnost předchozích výpočtů rozměrů částí stroje, které jsem aplikoval při kreslení technických výkresů.

Toto téma diplomové práce mi pomohlo rozšířit si vědomosti týkající se elektrických strojů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

I. Literatura

- [1] CIGÁNEK L.: *Stavba elektrických strojů*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1958. 714 s.
- [2] ČERVENÝ J.: *Postup při elektromagnetickém návrhu synchronního stroje*, ZČU Plzeň, 2011. 18 s.
- [3] ČERVENÝ J.: *Konstrukční tabulky*, ZČU Plzeň, 2010. 20 s.
- [4] FIŠER J.: *Návrh synchronního stroje s vyniklými póly*, diplomová práce, ZČU Plzeň, 2010. 61 s.
- [5] KOPYLOV I. P. A KOL.: *Stavba elektrických strojů*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1988. 685 s. ISBN 04-532-88
- [6] POKORNÝ K.: *Stavba elektrických strojů I*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1981. 186 s. ISBN 05-078-81
- [7] POKORNÝ K.: *Stavba elektrických strojů II*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1983. 320 s. ISBN 05-047-83
- [8] ŠVEC Z.: *Návrh synchronního stroje s vyniklými póly*, semestrální práce SES2, ZČU Plzeň, 2011. 17 s.
- [9] WIEDEMANN E., KELLENBERGER W.: *Konstrukce elektrických strojů*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1973. 652 s. ISBN 04-534-73

II. Internet

- [10] http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_synchronni_stroje_bc.pdf, [cit. 2012-02-08].
- [11] http://sipal.fvtm.ujep.cz/EIEI/EIEI_10.pdf, [cit. 2012-02-08].
- [12] <http://vyuka.fel.zcu.cz/kev/SES1,2%20-20Kombi/SKRIPTA/Projektov%a0n%a1%20elektrick%ecch%20za%fd%a1zen%a1.pdf>, [cit. 2011-10-26].
- [13] <http://vyuka.fel.zcu.cz/kev/SES1,2%20-%20Kombi/SKRIPTA/Konstrukce.pdf>, [cit. 2011-10-26].
- [14] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elekriny/obnovitelne-zdroje/voda/dlouhe-strane.html>, [cit. 2012-03-05].

- [15] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elekriny/obnovitelne-zdroje/voda/hracholusky.html>, [cit. 2012-03-05].
- [16] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elekriny/obnovitelne-zdroje/voda/lipno.html>, [cit. 2012-03-05].
- [17] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elekriny/obnovitelne-zdroje/voda/orlik.html>, [cit. 2012-03-05].
- [18] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elekriny/obnovitelne-zdroje/voda/slapy.html>, [cit. 2012-03-05].
- [19] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elekriny/obnovitelne-zdroje/voda/vrane.html>, [cit. 2012-03-05].
- [20] <http://www.cezenergoserwis.cz/vodni-elekrarny-rekonstrukce/>, [cit. 2012-01-02].
- [21] <http://www.ckdblansko.cz/small-hydro-vodni-turbiny-a-hydrotechnicka-zarizeni/-/>, [cit. 2012-03-06].
- [22] http://www.elektrotechnika.6f.sk/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=73, [cit. 2012-02-08].
- [23] <http://www.inforse.dk/europe/fae/OEZ/voda/voda.html>, [cit. 2012-02-19].

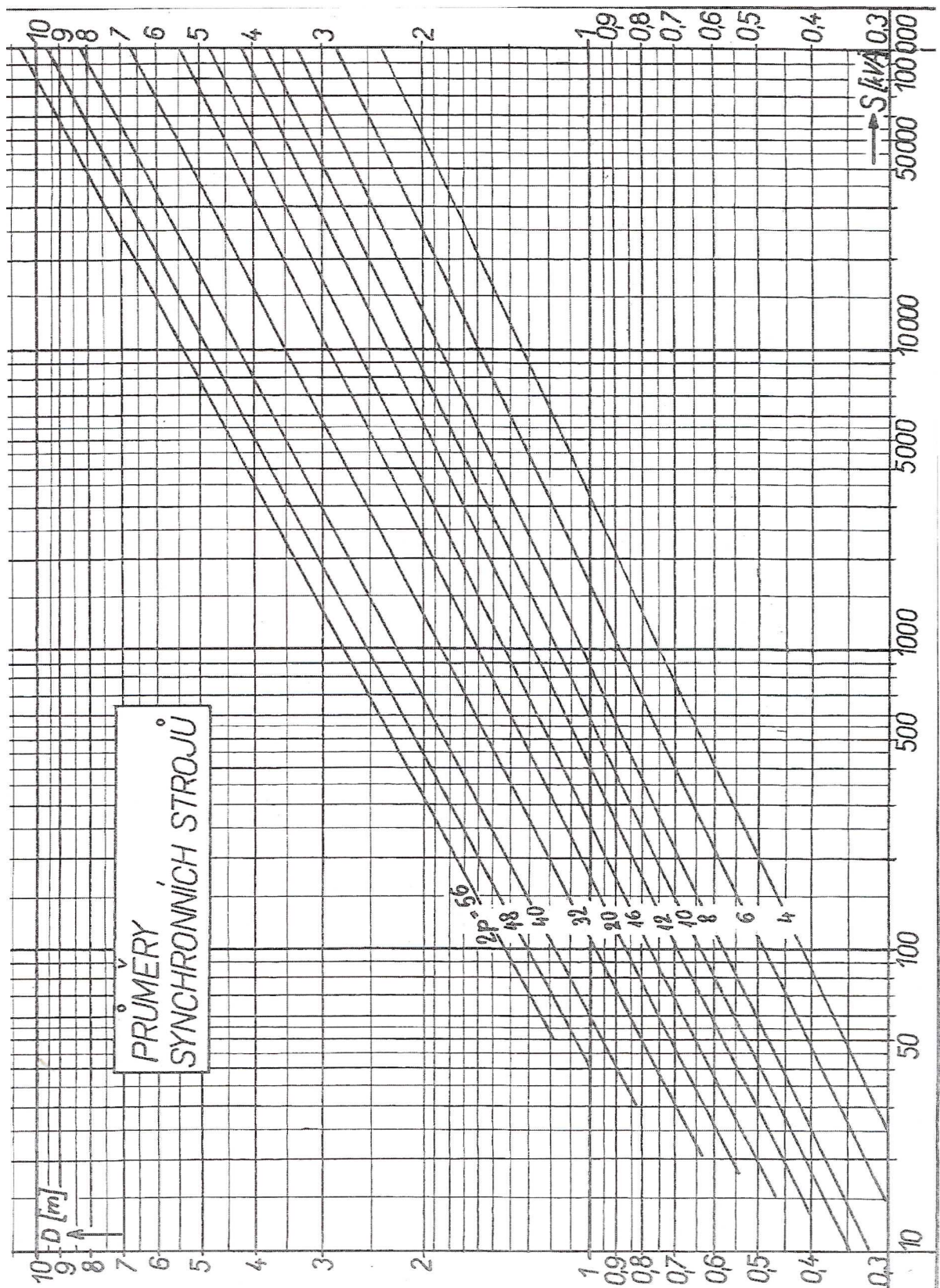
Seznam příloh

- [1] Průměry synchronních strojů
- [2] Určení obvodové proudové hustoty a indukce ve vzduchové mezeře
- [3] Tvary drážek pro vinutí
- [4] Rozměry drážek
- [5] Rozměry měděných pásů
- [6] Deformační činitel magnetického napětí
- [7] Amplitudy základní harmonické magnetického napětí
- [8] Carterův činitel na drážkování
- [9] Určení intenzity magnetického pole ve statoru
- [10] Určení intenzity magnetického pole v pólu
- [11] Určení skutečné magnetické indukce v zubech induktu
- [12] Chladihost v proudícím vzduchu
- [13] Činitelé povrchových ztrát v pólovém nástavci
- [14] Tingleyho schéma vinutí
- [15] Synchronní stroj v příčném směru – technický výkres (formát A3)
- [16] Synchronní stroj v podélném směru – technický výkres (formát A3)

Přílohy (1 – 13) – zdroj [3]

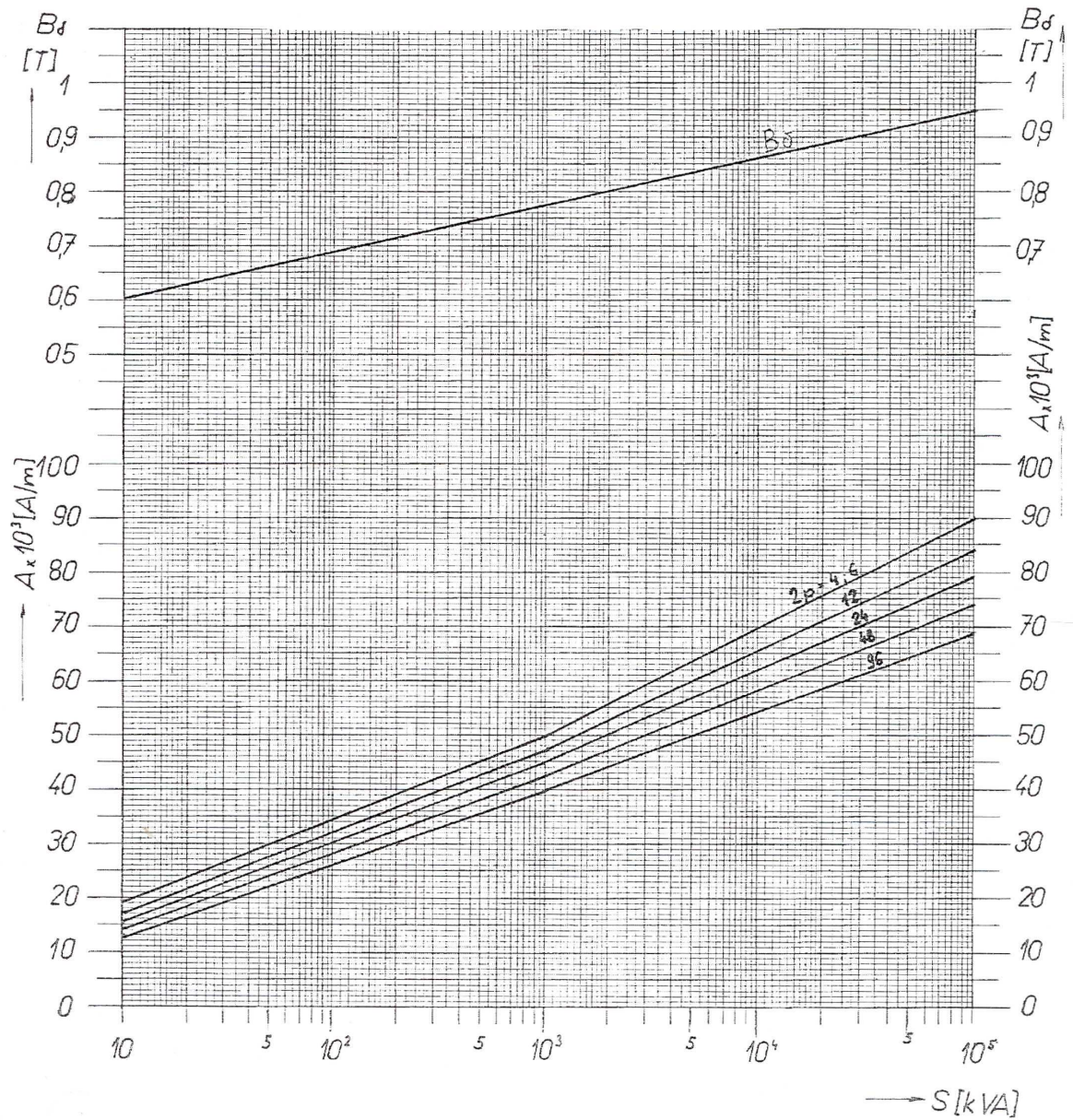
Příloha č. 1

Průměry synchronních strojů



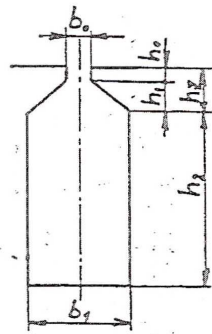
Příloha č. 2

Určení obvodové proudové hustoty a indukce ve vzduchové mezeře

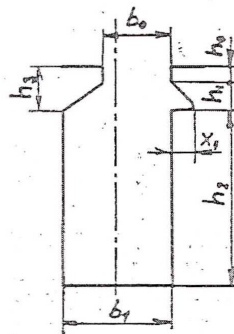


Příloha č. 3

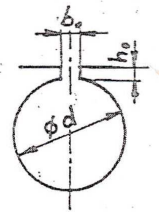
Tvary drážek pro vinutí



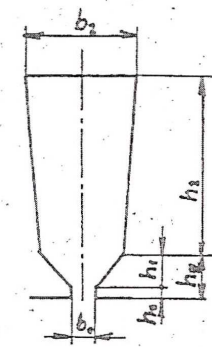
drážka D



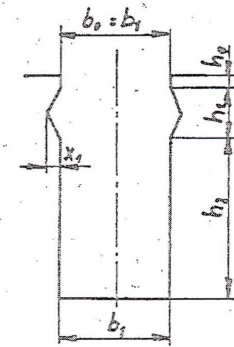
drážka F



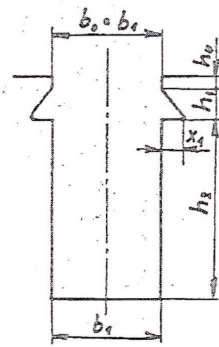
drážka K



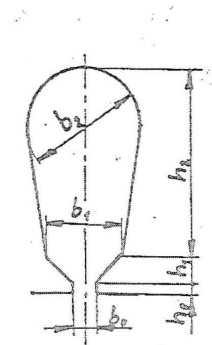
drážka L



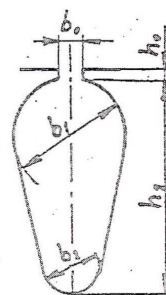
drážka M



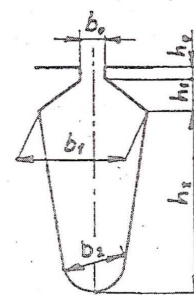
drážka N



drážka S



drážka V



drážka W

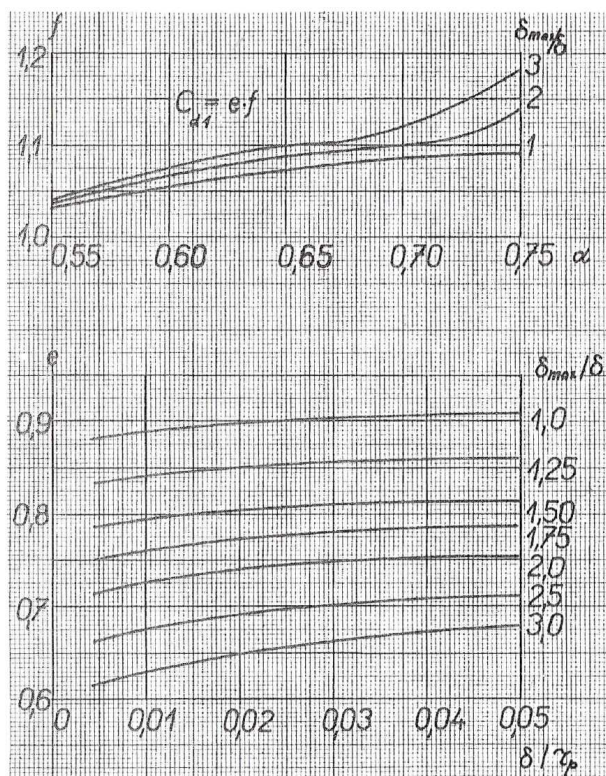
Příloha č. 4

Rozměry drážek

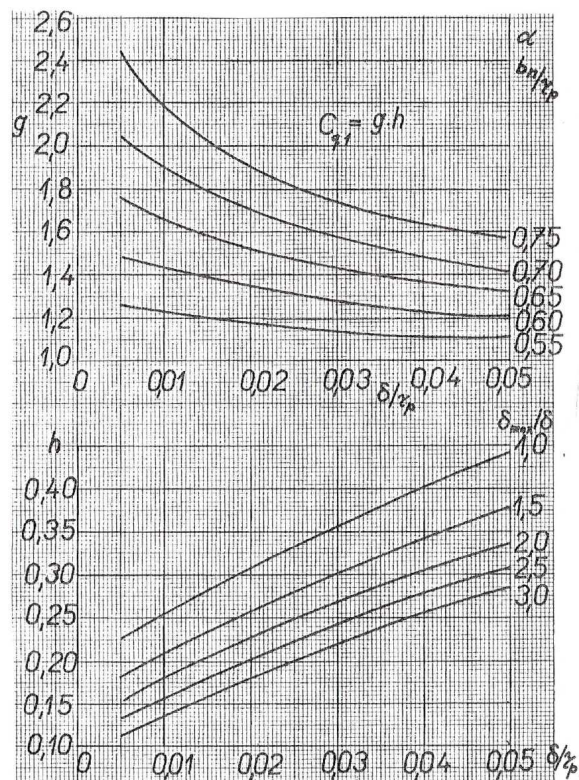
Drážka M				Drážka N							
b_f	h_o	h_f	x_f	b_f	h_o	h_f	x_f				
5	0,7	3,5	1,2	5	0,7	3,3	2,31				
5,2		3,3	1,1	5,2							
5,5		3,6	1,2	5,5							
5,8		3,5	1,2	5,8							
6		3,3	1,1	6							
6,3		4	1,4	6,2							
6,6		3,6	1,25	6,5							
7		4	1,4	6,8							
7,3		3,6	1,25	7							
7,6		4	1,4	7,2							
8		4	1,4	7,5							
8,5		3,6	1,15	7,8							
9		4	1,4	8							
9,5		3,6	1,15	8,5							
10	4	1,4	1,4	9	3,8	2,66					
10,5				9,5							
11				10,5							
11,5				11							
12				11,5							
12,5				12							
13				12,5							
13,5				13							
14				13,5							
/14,5/				14							
15	5	1,65	1,65	14,5	4,3	3,01					
/15,5/				15							
16				/15,5/							
/16,5/				16							
17	6	1,6	1,6	/16,5/	1	4,8	3,3				
/17,5/				17							
/18,5/				18							
19				/17,5/							
/19,5/				18,5/							
20				19							
/20,5/	1			/19,5/							
21				20							
/21,5/				21							
22				22							
/22,5/				23							
23				24							
/23,5/				9			2,45	2,45	$\lambda_z = \frac{2,3h_f}{2b_f + x_f} + \frac{h_o}{b_o}$		
24											
25											
26											
27											
28											
30											
32											

Příloha č. 6

Deformační činitel magnetického napětí



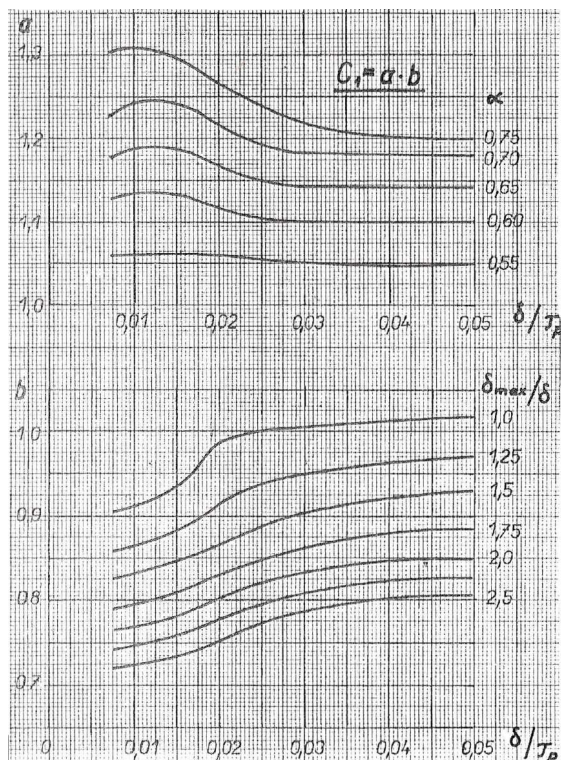
v podélné ose



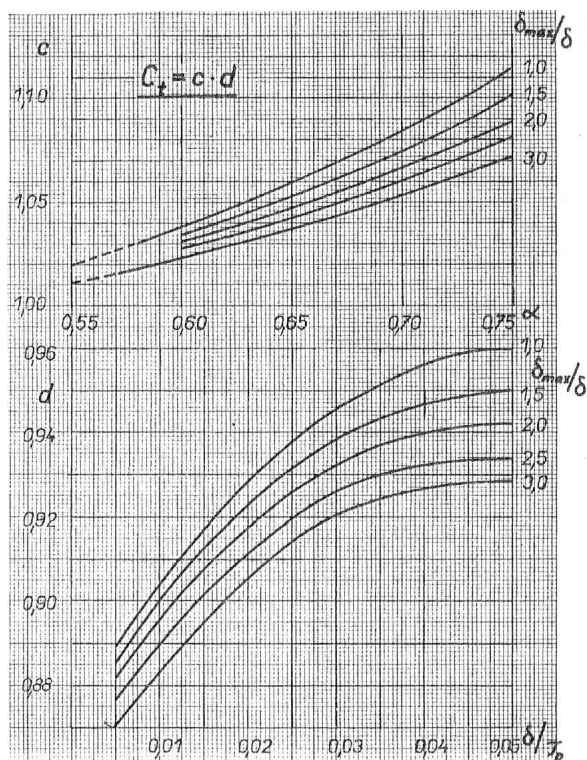
v příčné ose

Příloha č. 7

Amplitudy základní harmonické magnetického napětí



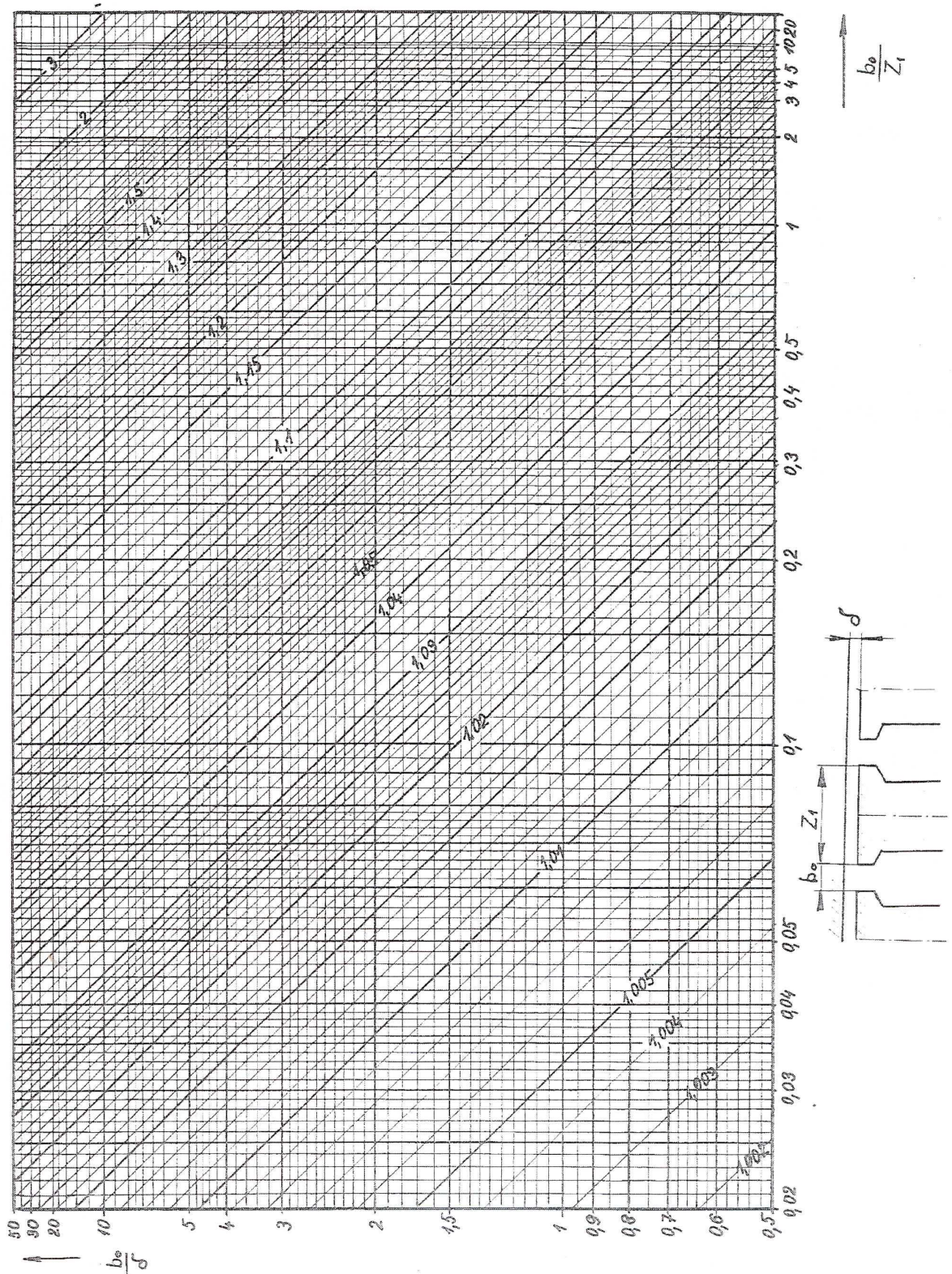
Činitel základní harmonické magnetické indukce



Činitel tvaru magnetického toku

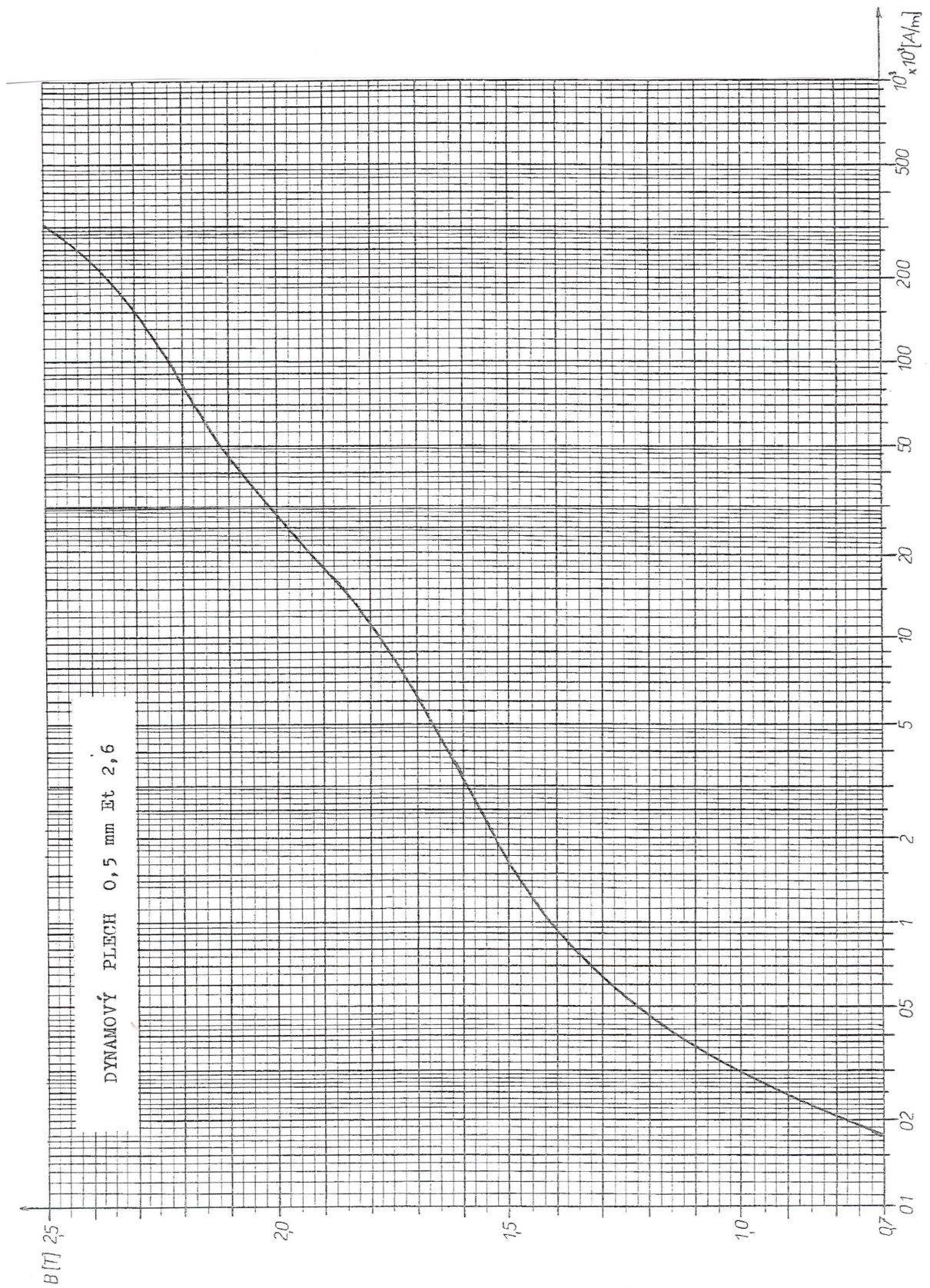
Příloha č. 8

Carterův činitel na drážkování



Příloha č. 9

Určení intenzity magnetického pole ve statoru



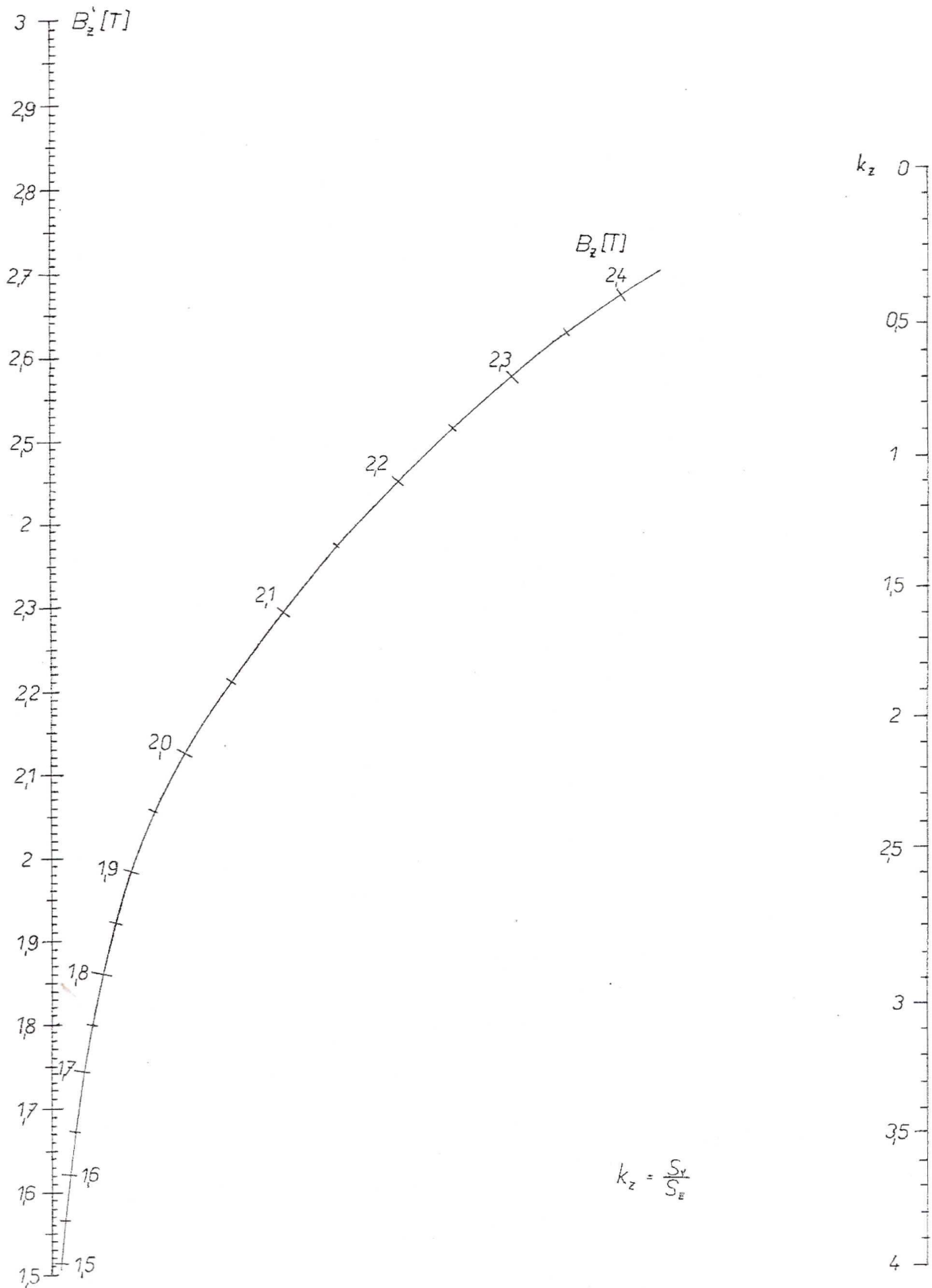
Příloha č. 10

Určení intenzity magnetického pole v pólu



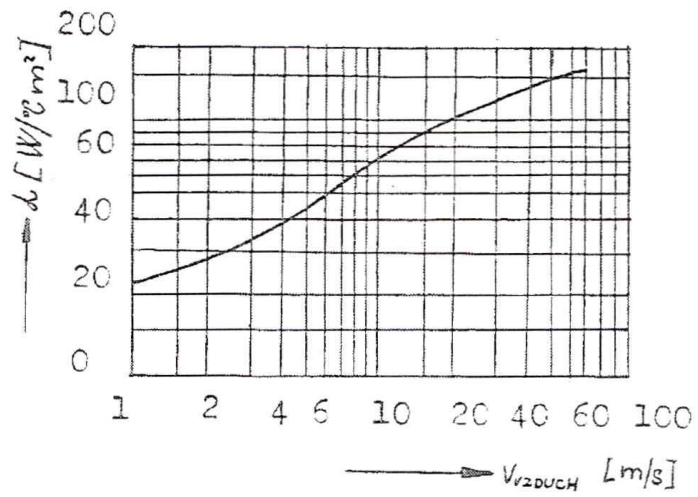
Příloha č. 11

Určení skutečné magnetické indukce v zubech induktu



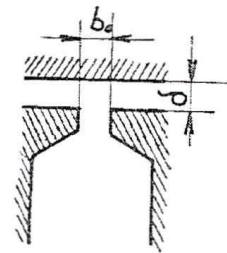
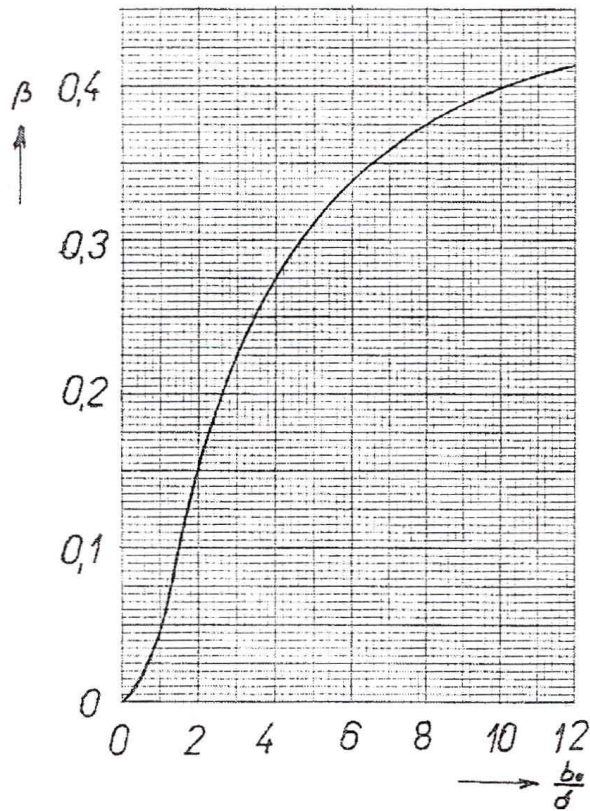
Příloha č. 12

Chladihost v proudícím vzduchu



Příloha č. 13

Činitelé povrchových ztrát v pólovém nástavci



$k_p = 23,3$ kovaná ocel

17,5 litina

8,6 plech 2 mm

2,8 plech 0,5 mm

